



E-ISSN: 2547-958X

# FMD

FEN VE MÜHENDİSLİK  
ERGİSİ

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ FEN VE MÜHENDİSLİK DERGİSİ (FMD)  
DOKUZ EYLUL UNIVERSITY ENGINEERING FACULTY JOURNAL OF SCIENCE AND ENGINEERING (JSE)

CİLT: 26  
SAYI:77  
YIL: Mayıs 2024

VOLUME: 26  
ISSUE:77  
YEAR: May 2024



MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ  
FEN VE MÜHENDİSLİK DERGİSİ  
CİLT: 26. SAYI:77 YIL:2024  
Elektronik ISSN: 2547-958X

**Elektronik Dergi -2024**

**Dergi Sahibi:** Dokuz Eylül Üniversitesi

**Yayın Sahibi:** Prof. Dr. Azize Ayol

**Elektronik Yayın Yapan:** DEÜ Mühendislik Fakültesi

**Dergi İletişim Adresi:** Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dekanlığı Tınaztepe Yerleşkesi, Adatepe Mah. Doğu Cad. No: 207-1 / 35390 Buca-İZMİR.

**Baş Editör:**

Doç.Dr. Serkan EKER

**Editörler Kurulu:**

Prof. Dr. Gülseren KARABAY Tekstil Mühendisliği Bölümü  
Doç. Dr. Taner GÖKTAŞ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Prof. Dr. Tolga GÖNENÇ Jeofizik Mühendisliği Bölümü  
Prof. Dr. A. Hamdi DELİORMANLI Maden Mühendisliği Bölümü  
Doç. Dr. Mustafa DOĞAN İnşaat Mühendisliği Bölümü  
Prof. Dr. Yusuf ARMAN Makina Mühendisliği Bölümü  
Doç. Dr. Metin YURDDAŞKAL Metalurji ve Malzeme. Mühendisliği. Bölümü  
Prof. Dr. Derya BİRANT Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Uğurcan ATMACA Havaçılık ve Uzay Mühendisliği  
Prof. Dr. Aylin ALIN Fen Fakültesi İstatistik Bölümü  
Prof. Dr. Muhammed DENİZ Fen Fakültesi Fizik Bölümü  
Doç. Dr. Burcu Silindir YANTIR Fen Fakültesi Matematik Bölümü  
Doç. Dr. Mine ANTEP Fen Fakültesi Kimya Bölümü  
Dr.Öğr. Üyesi Işıl ÖZCAN Amerikan Kültürü ve Edebiyatı Bölümü (Dil Editörü)

**Teknik Editörler:**

Dr.Öğr.Üyesi Celal Cem SARIOĞLU, Fen Fakültesi, Matematik Bölümü

Arş.Gör. Meltem GÜLLÜSAÇ, Fen Fakültesi, Matematik Bölümü

**Dil Editör:**

Dr.Öğr. Üyesi Işıl ÖZCAN Amerikan Kültürü ve Edebiyatı Bölümü

**Bilgi İşlem:**

Doç.Dr. Muhammet DAMAR, Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörlük Bilgi İşlem Daire Başkanlığı

**Yayın Danışma Kurulu:**

Dr Öğr Üye ÖMER AYDIN Manisa Celal Bayar Üniversitesi, TÜRKİYE  
Dr Öğr Üye Enis KARAARSLAN Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Nuri AZBAR Ege Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Filiz DİLEK Orta Doğu Teknik Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Ayhan ALTINTAŞ Bilkent Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Cem ÇİVELEK Türk-Alman Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Adil BAYKASOĞLU Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Gülçin FEYZİOĞLU Galatasaray Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ Konya Teknik Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Alper İLKI İstanbul Teknik Üniversitesi, TÜRKİYE  
Dr. Harris VANGELIS National Technical University of Athens, GREECE  
Prof. Dr. Bülent ORUÇ Kocaeli Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof.Dr.Anastasia KIRATZİ Aristotle University of Thessaloniki, GREECE  
Prof.Dr.Despina KONTOPOULOU Aristotle University of Thessaloniki, GREECE  
Prof.Dr.Gregory TSOKAS Aristotle University of Thessaloniki, GREECE  
Prof.Dr. Ivana VASILJEVIĆ University of Belgrade, SERBIA  
Prof. Dr. Osman CANDAN Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Gültekin TARCAN Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Can GENÇ İstanbul Teknik Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Şebnem DÜZGÜN Colorado School of Mines,USD  
Prof. Dr. Serkan SAYDAM The University of New South Wales, AUSTRALIA  
Prof. Dr. Cengiz KUZU İstanbul Teknik Üniversitesi, TÜRKİYE  
Doç. Dr. Mehmet Siddik KIZIL The University of Queensland, AUSTRALIA  
Prof. Dr. Binnur Gönen KIRAL Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Hasan ÖZTÜRK Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Gürel ÇAM Iskenderun Teknik Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Hakan GAŞAN Osmangazi Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Merih SARIŞIK Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Cevza CANDAN İstanbul Teknik Üniversitesi, TÜRKİYE  
Dr. Öğr. Üyesi Hediye ATIK Atılım Üniversitesi, TÜRKİYE  
Dr. Öğr. Üyesi Sedat TOKGÖZ Gebze Teknik Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Dr. Serpil ŞAKIROĞLU Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE  
Doç. Dr. Ümit AKINCI Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE  
Prof. Lin Shin TED Sichuan University, CHINA  
Prof. Dr. Mieczyslaw CICHON Adam Mickiewicz University, POLAND  
Prof. Dr. Selçuk DEMİR Dokuz Eylül Üniversitesi, TÜRKİYE

**Elektronik erişim adresleri**

DergiPark Akademik adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/deumffmd>

DEU web adresi: <https://web.deu.edu.tr/fmd/index.htm>

Dergide yayımlanan makalelerin bilimsel içerik ve dil sorumluluğu yazarlara aittir.

Dergide yayımlanan makaleler kaynak gösterilmeden kullanılamaz.



## Betonarme Çerçevelerde Yumuşak Kat Etkilerinin Yeni Nesil Dolgu Duvarlar ile Azaltılması

### Reducing Soft-Story Effects in Reinforced Concrete Frames with New Generation Infill Walls

Prost Iverden BALENDA BAKALA<sup>1</sup>, İbrahim Serkan MISIR<sup>2</sup>, Ömer ALDEMİR<sup>3\*</sup>

<sup>1,2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

<sup>3</sup> Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author\*: omeraldemir@gazi.edu.tr

#### Öz

Çeşitli amaçlarla özellikle zemin kat dolgu duvarları kaldırılmış çok sayıda binanın depremler sırasında bu katta artan yanıl deplasman talebiyle yumuşak kat/zayıf kat mekanizmaları sergilediği ve binanın bu kat üzerine çöktüğü geçmiş depremlerden bilinmektedir. Sunulan çalışmanın amacı, 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde de kabul gören yeni nesil dolgu duvarların betonarme çerçevelerde yumuşak kat oluşumunu azaltmadaki etkilerini araştırmaktır. Çalışma kapsamında dolgulu betonarme çerçeve modelleri üzerinde doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiş, göz önüne alınan çok katlı düzlemsel çerçevelerde yumuşak kat etkilerinin belirgin hale gelmesi için modellerde yalnızca üst katların açıklıklarında dolgu duvar etkisi dikkate alınmıştır. Analizde kullanılan çerçeve ve dolgu duvar parametreleri, dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız düzlemsel betonarme çerçeveler üzerinde daha önce yürütülen yarı statik testlerden elde edilmiştir. Simülasyonlar, geleneksel dolgu duvar duruma kıyasla yeni nesil duvar kullanımının, ilk katları dolgunsuz binalarda bile yumuşak/zayıf kat oluşumunu azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Dolgulu betonarme çerçeveler, deprem güvenliği, yumuşak kat düzensizliği, yeni nesil dolgu duvarlar, esnek duvar

#### Abstract

Past earthquakes have shown that many buildings with infill walls, especially due to the walls being removed for various purposes on the first floor, exhibit soft-story/weak story mechanisms due to increased lateral displacement demand during earthquakes and building collapse on that floor. The aim of the present study is to investigate the effect of new generation infill walls, introduced as a new concept in the Turkish Building Earthquake Code-2018, in reducing the soft story formation in reinforced concrete frames. Within the scope of the study, nonlinear analyses were performed on numerical models of reinforced concrete frames with only the upper stories infilled in order to force the models to exhibit soft-story irregularities. The frame and infill wall parameters used in the analysis were obtained from the quasi-static tests on planar reinforced concrete frames with and without infill walls. Numerical simulations showed that the use of new generation infill walls has the potential to reduce the soft story formation even in the buildings with unfilled first stories, compared to fully infilled model cases.

**Keywords:** Infilled reinforced concrete frames, earthquake safety, soft storey irregularity, new generation infill walls, flexible wall

#### EXTENDED ABSTRACT

##### Introduction

The conventional practice of neglecting the stiffness and strength properties of infill walls in structural design for reinforced concrete structures overlooks their significant impact on the structural behavior. Recent studies have highlighted this effect, emphasizing the need for attention to infill walls. Moreover, irregular layout of infill walls between adjacent floors introduces variations in stiffness, potentially leading to undesirable collapse mechanisms. To address these concerns, some novel infill wall designs have been proposed based on experimental research such as Misir et al. (2012) and Preti et al. (2012). The proposed designs minimized the panel action of the walls by using horizontal sliding joints on some or each mortarless bed joints between the brick layers.

##### Materials and Methods

Misir et al. (2015) constructed and analyzed Finite Element (FE) models representing the test specimens. Calibration parameters derived from the simulations of the numerical models were then utilized to construct multi-story frame models. These models investigated the impact of using sliding walls on the soft story mechanism. Furthermore, nonlinear two-dimensional FE models were constructed to represent the previously tested infilled frame specimens. Numerical model parameters were calibrated using experimental data. Subsequent numerical analyses simulated damage distribution, load-displacement envelope curves, and experimental outcomes with acceptable accuracy. Three-story frame models, with varying infill conditions, were examined using the damage patterns.

## Conclusion

In the analyzed configurations, the ground floors were constructed without infill walls, aligning with common practices in our region and neighboring areas, while infill walls were integrated into the upper floors. It was observed that traditional brick wall usage on the ground floor led to an increase in displacement demand and facilitated the formation of the soft story mechanism. Upon analysis, it was evident that the ground floor of traditional infilled models exhibited significantly higher

deformation demands compared to both empty frame and sliding infill frame models. Similarly, in three-story models equipped with sliding infill walls, which possess lower in-plane stiffness, deformations closely resembled those of frames without infill for all floors. Importantly, noninfilled ground floor in this model helped to mitigate the adverse effects and minimized the potential for soft story formation.

## 1. Giriş

Betonarme yapılar, sağladığı esnek tasarım olanakları ve yapım kolaylığı nedeniyle oldukça sık tercih edilmektedir. Genellikle betonarme yapıların inşasında, iç mekânı dışarıdan izole etmek ve bölmek için, betonarme çerçeveler arasına dolgu duvarlar inşa edilir. Böylece dolgu duvar ve betonarme çerçevelerin birleşiminden doğan daha karmaşık bir kompozit yapı oluşturulur. Betonarme binalarda kullanılan yatay delikli donatısız yığma duvarların yapının çeşitli yüklemeler altındaki davranışını önemli ölçüde değiştirebileceği bilinmesine rağmen güncel şartnamelerde yapısal olmayan eleman kategorisinde ele alınmaktadır. Bu nedenle yeni binaların tasarımında ve mevcut binaların değerlendirilmesinde dolgu duvarların yapısal davranış üzerindeki etkileri göz ardı edilir [1, 2]. Ayrıca, dolgu duvarlı betonarme (BA) çerçeve sistemler üzerine yapılan araştırmalarda dolgu duvarların varlığının yapısal sistem davranışına etkisi enerji tüketim ilişkileri ve ötelenme limitleri açısından tam olarak belirlenememiştir [3]. Deprem etkisi altındaki dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin irdelendiği bir diğer çalışmada [4], dolgu duvarlı yapı hasarının, dolgu duvar ve çerçeve arasındaki etkileşim nedeniyle boş çerçeve yapıdan açıkça farklı olduğu gösterilmiştir. Dolgu duvar yapısal olmayan bir eleman olarak dikkate alınmasına rağmen, deprem etkileri altında yapısal sistemin mekanik davranışı ve deprem performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [5, 6]. Negro ve Verzeletti [7] tarafından yapılan çalışmalarda da yığma duvar kullanımının ana yapının dış yükler altındaki davranışını önemli ölçüde etkilediğini belirtmektedir. Genel olarak, yapısal olmayan duvar panellerinin varlığı, yapının yatay yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı için faydalı bir etkiye sahiptir. Bunun yanında, yapının başlangıç rijitliğini artırarak serbest titreşim periyodunun azalmasına sebep olur. Dolgu duvarlar çerçevenin hem rijitliği hem de ötelenme davranışı üzerinde büyük değişikliklere neden olmakta ve değişikliklerin etkisi duvarın göçme moduna bağlı olarak avantajlı veya dezavantajlı olabilmektedir. Dolgu duvar, yapının başlangıç rijitliğini ve statik yükler altındaki dayanımını artırmasına rağmen, araştırmalar, yığma dolgu duvar varlığının yapının dinamik yükler altındaki davranışını olumsuz etkileyerek, dayanım, rijitlik ve enerji tüketme kapasitesinde ani kayıplara neden olduğunu göstermiştir [8, 9]. Ayrıca, yığma dolgu duvarların kontrolsüz kullanımı yumuşak kat mekanizmaları ve kısa kolon davranışı gibi bazı istenmeyen durumlara neden olmaktadır. Geçmiş depremlerde yaşanan can kayıpları, çoğunlukla dolgu duvarların bilinçsizce kullanımından doğan ani göçmeler ile ilişkilendirilmiştir [16]. Depremlerde can kaybına sebep olabilecek bu tür göçme mekanizmaları gerçekleşmesi kullanılan dolgu duvar malzemesinin ve derz özelliklerinin (harçlı derz, kuru derz) mekanik özellikleri ile yakından ilişkilidir. Çoğunlukla harç derzinin mekanik özellikleri ve daha özel olarak kesme davranışı, yığma yapıların zayıf noktalarına karşılık geldikleri ve doğrusal olmayan davranışı domine ettikleri için duvar davranışında baskın bir rol oynar [10]. Birçok ülkede, öncelikle

bir park yeri veya mağaza oluşturmak için, dolgu duvarlı BA çerçeve binaların ilk katının açık bırakılması yaygındır. Bu binalarda ilk kat dışındaki tüm katlarda yığma dolgu duvarlar mevcuttur [11, 12, 13, 14]. Bu, yumuşak kat mekanizması olarak bilinen depremlerdeki en yaygın göçme nedenlerinden birine öncülük eder.

Yeni yapılacak binaların tasarımında ve mevcut binaların değerlendirilmesinde yapısal olmayan dolgu duvarların kendi deprem performansı ve içinde bulunduğu yapının deprem performansına etkisi ayrı ayrı öneme sahiptir. Bu nedenle, yapısal davranışın iyileştirilmesine katkı sağlayacak yeni nesil yığma dolgu duvar yapım tekniklerinin geliştirilmesi sürdürülebilir kentler oluşturabilmek için önemli bir konu haline gelmiştir. Bu teknikler çoğunlukla yığma birim, harç, donatı, bağlantı elemanları vb. gibi malzemelerin geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Geliştirilen yeni teknikler ile deprem hasarı ve göçme riskini azaltacak, gerekli fonksiyonel (termal, akustik ve deformasyon) dayanıklılığı karşılayacak duvar tasarımları hedeflenmektedir. Bu amaçla Mısır vd. [12] tarafından yapılan araştırmada dolgu duvar hasarının sünek göçme modları ile gerçekleştiği bir yapım tekniği önerilmiştir. Bu çalışmada üst yüzünde uzunlamasına bir ray ve alt yüzünde uzunlamasına bir oluk bulunan yatay delikli "kilitli" kil tuğlalardan yapılmış dolgu duvarların performansını betonarme çerçeveler içinde test edilmiştir. Ardışık tuğla sıraları, harçsız olarak yerleştirildiğinden dolgu duvarın düzlem içi yönde hareketi serbest hale getirilmiştir. 150 mm genişliğinde geleneksel tuğla ve harçsız kilitli tuğla kullanılan iki adet dolgu çerçeve ve bir adet boş çerçeve olmak üzere toplam üç adet tek açıklıklı tek katlı BA çerçeve numunesi %3,5 ötelenme oranına kadar çevrimsel yük altında test edilmiştir. Yapılan testlerde geleneksel dolgu duvar ile üretilen numuneye kıyasla kilitli dolgu duvar ile inşa edilen çerçeve numunesinin çerçevenin yanal yük direncine katkısı belirgin derecede düşük kalmıştır. Kilitli duvar blokları  $\pm\%3,5$  ötelenme oranlarında dahi neredeyse hasar almadan çerçeve ile birlikte deforme olabilmisti. Bu çalışma kapsamında, bahsi geçen deneysel çalışmadaki test numunelerinin FE modelleri analiz edilerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu referans numuneleri benzeştiren sayısal modellerin analizinden elde edilen kalibrasyon parametreleri kullanılarak çok katlı çerçeve modelleri kurulmuş ve kayar tuğla duvar kullanımının yumuşak kat mekanizması üzerindeki etkisi incelenmiştir.

## 2. Amaç

Genellikle yapı elemanlarının veya sistemlerinin yapısal davranışının incelenmesi için laboratuvar testlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ne var ki maliyet, zaman ve fiziksel kısıtlar yeterli çeşitlilikte laboratuvar testinin yapılmasının önünde bir engeldir. Bu nedenle deneysel çalışmaların planlama aşamasında, numune ve deney düzeneğinin tasarımı süreçlerinde ve deneyi yapılamayan büyük boyutlu numunelerin davranışının irdelenebilmesi amacıyla sayısal model çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak inşaat mühendisliği malzemelerinin ve yapılarının sahip olduğu belirsizlikler nedeniyle numunelerin



gerçekçi sonuçlar verecek sayısal modellerinin kurulması kolay değildir. Bu nedenle sayısal model sonuçlarının deneysel verilerle kalibre edilmesi ve belirsiz model parametrelerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Böylece kalibre edilmiş model parametreleri kullanılarak parametrik analizler yürütmek ve bulguları genelleştirmek mümkün hale gelmektedir. Bu çalışma kapsamında, bahsi geçen referans dolgu betonarme çerçeve numunelerinin sayısal modelleri kurulmuş, deney sonuçlarıyla kalibre edilmiş model parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen kalibrasyon parametrelerini kullanarak deprem etkisi altındaki çok katlı çerçeve yapılarında kayar tuğla kullanımının yumuşak kat mekanizması üzerindeki etkisini irdelemek amaçlanmıştır.

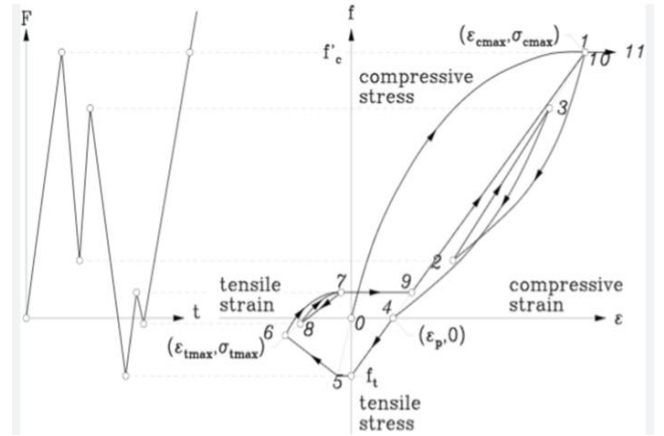
### 3. Sayısal Modeller ve Model Kalibrasyonu

Kalibrasyon parametrelerin elde edilmesi amacıyla Mısır vd. [12] tarafından test edilen iki adet dolgu ve bir adet dolgunsuz çerçeve numunesinin sayısal modelleri hazırlanmıştır. Deney numuneleri ve test düzeneğine ilişkin detaylı bilgiler ilgili makalede yer almaktadır. Sayısal modellerin oluşturulması sırasında dikkate alınan numune geometrisi ve tuğla birimlere ait görüntüler Şekil 3'te sunulmuştur.

Kalibrasyon için yapılan analizlerde deney numuneleri ile aynı geometrik özelliklere sahip sayısal modeller kullanılmıştır (Şekil 4). Sayısal modeller DIANA FEA v10.3 [15] yazılımında iki boyutlu olarak hazırlanmış, referans olarak dikkate alınan deney numunelerin donatı konfigürasyonu ve malzeme karakteristiği dikkate alınarak gerekli tanımlamalar modele eklenmiştir. Modeller iki boyutlu olarak tasarlandığı için kolon ve giriş elemanlarda enine donatılar nedeniyle oluşan sargı etkisi *Maekawa Concrete* [17] beton modeli kullanılarak sargılı betonun mekanik özellikleri elde edilmiş ve sayısal modele tanımlanmıştır. Dikkate alınan beton modeline ait histeretik yüklemeler altındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 1'de verilmiştir. Donatı çeliği için Menegotto-Pinto [19] modeli dikkate alınmıştır (Şekil 2). Yığma duvar birimleri ise kayar tuğla özelliklerini de dikkate alabilmek için mezo modelleme tekniği esas alınarak hazırlanmıştır.

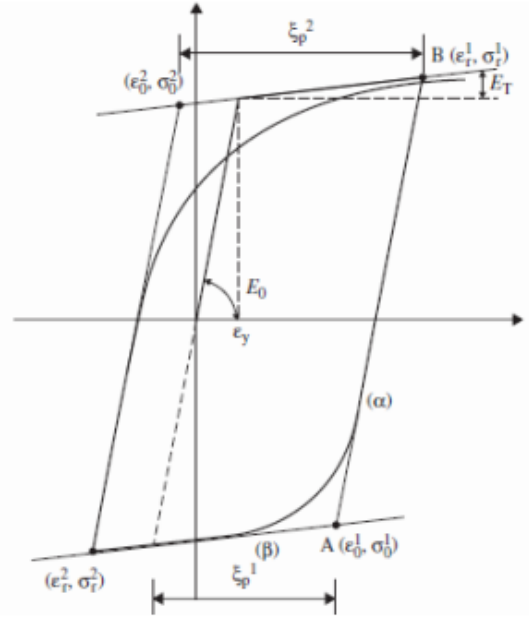
Hazırlanan sayısal modeller referans numunelerin deney düzeneğine uygun olarak (Şekil 5) yüklenmiş ve elde edilen nümerik sonuçlar deney sonuçları ile kıyaslanarak gerekli kalibrasyon yapılmıştır. Kalibrasyon parametresi olarak yığma duvar biriminin elastisite modülü dikkate alınmıştır. Kalibrasyon sonucunda duvar biriminin elastisite modülü 1100 MPa olarak dikkate alınmıştır. Bu kapsamda normal tuğla duvar (SBF), ilgili çalışmada önerilen kayar tuğla duvar (LBF) ve dolgu duvarsız (BaF) hazırlanmış çerçeve sistemler analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda SBF ve LBF modellerinin %0,20; %0,62; %2,00 ve %3,00 ötelenme oranına karşılık gelen hasar görselleri sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmuştur. İlgili görsellerde bulunan  $E_{cw}$  değerleri ötelenme seviyelerindeki çatlak genişliğine karşılık gelmektedir. Yapılan sayısal çalışmalarda ileri ötelenme seviyelerinde kayar tuğla duvarlı numunenin geleneksel tuğla duvarlı numuneye kıyasla daha az hasara uğradığı gözlemlenmiştir. Bu gözlem referans deney sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Arayüz, beton ve duvar birimleri için kalibre edilen parametreler sırası ile Tablo 1-3'te sunulmuştur. Kayar tuğla duvarlar arasında harç birimlerinin bulunmaması nedeniyle duvar-duvar arayüzü yalnızca sürtünme etkileri dikkate alınarak tanımlanmıştır.



Şekil 1. Maekeva beton modeli histeretik gerilme birim şekil değiştirme eğrisi [18]

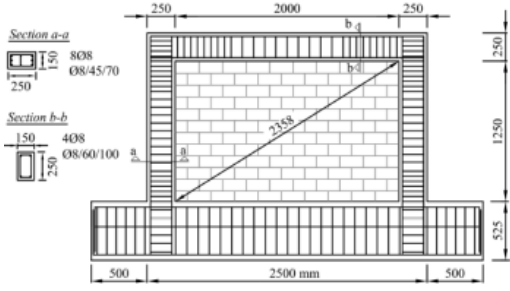
Figure 1. The hysteretic stress-strain curve of the Maekeva concrete model [18]



Şekil 2. Menegotto-Pinto modeli gerilme- birim şekil değiştirme eğrisi [18]

Figure 2. The stress strain curve of Menegotto-Pinto model [18]

Referans numunelere uygulanan çevrimsel yükleme ile uyumlu şekil değiştirme kontrollü yarı-statik yüklemeye maruz bırakılan sayısal modellerin analizi sonucunda, kurulan sayısal modellerin ötelenme seviyeleri ve dayanım açısından oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Buna karşılık kullanılan malzemelerin sahip olduğu birtakım belirsizlikler nedeniyle başlangıç rijitliği açısından deney numuneleri ve sayısal modeller arasında bir fark meydana gelmektedir. Deneysel ve sayısal tepe yükü-kat ötelenme oranı grafikleri Şekil 8'de verilmiştir.



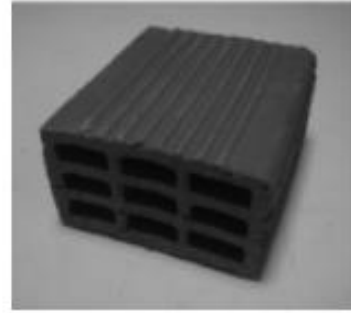
(a)



(b)



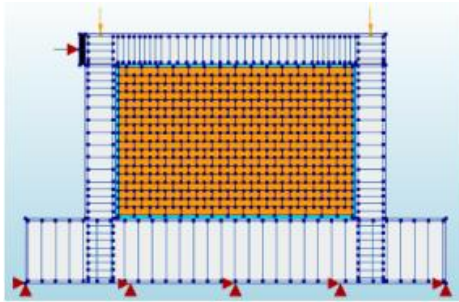
(c)



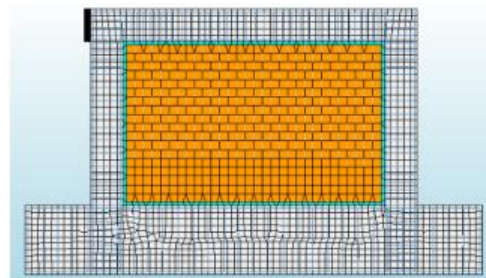
(d)

**Şekil 3.** (a) Deney elemanlarının geometrik özellikleri, (b) kayar duvar imalat aşaması, (c) kilitli tuğla birimleri ve (d) standart tuğla birimi [13].

**Figure 3.** (a) The geometric properties of test specimens, (b) construction stage of the sliding wall, (c) interlocking brick units, and (d) standard brick unit [13].



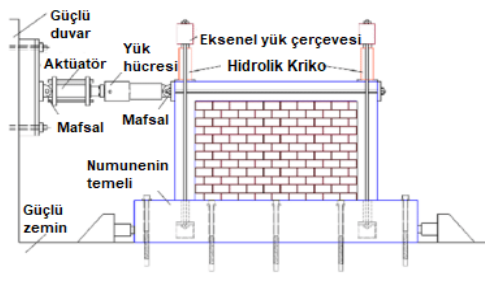
(a)



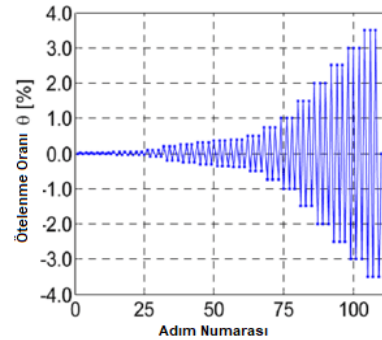
(b)

**Şekil 4.** (a) Sayısal modellere ait (a) donatı ve yükleme şeması ve (b) sonlu eleman ağı

**Figure 4.** (a) Reinforcement and loading diagram of the numerical models, and (b) the finite element mesh



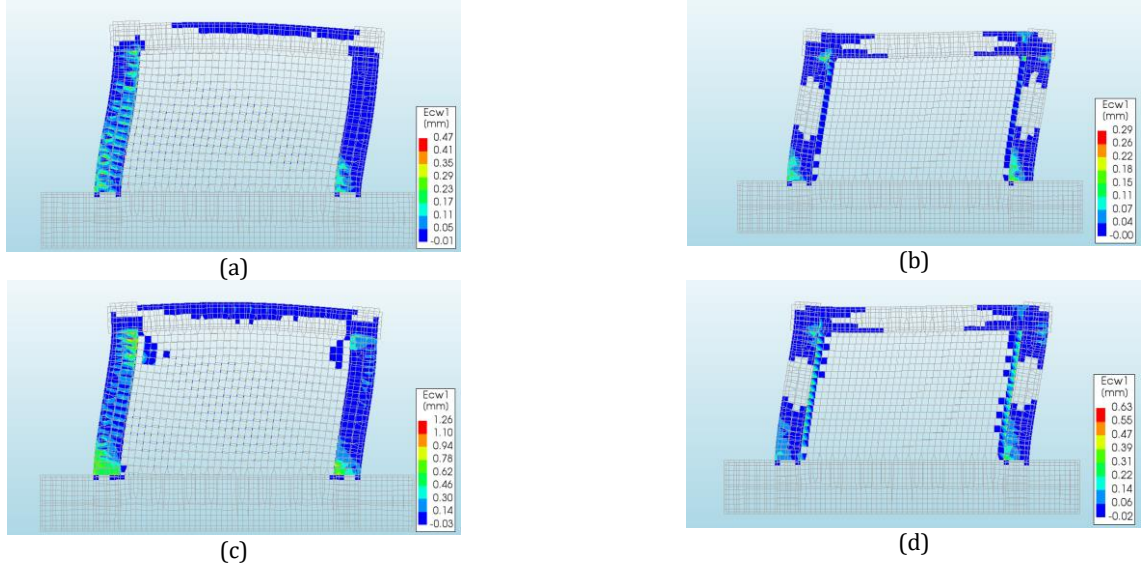
(a)



(b)

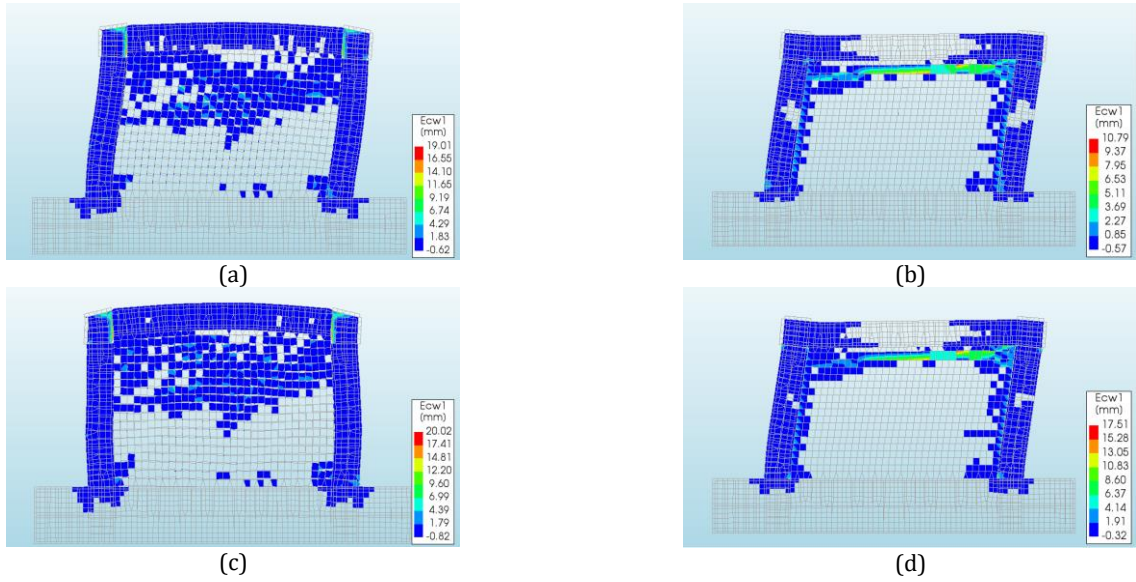
**Şekil 5.** (a) Yükleme sistemi ve (b) yükleme geçmişi

**Figure 5.** (a) Loading system and (b) loading history



Şekil 6. SBF ve LBF'nin % 0,20 (a, b) ve % 0,62 (c, d) ötelenme oranı için hasar dağılımı

Figure 6. Damage distribution of SBF and LBF for 0.20% (a, b) and 0.62% (c, d) drift ratio.



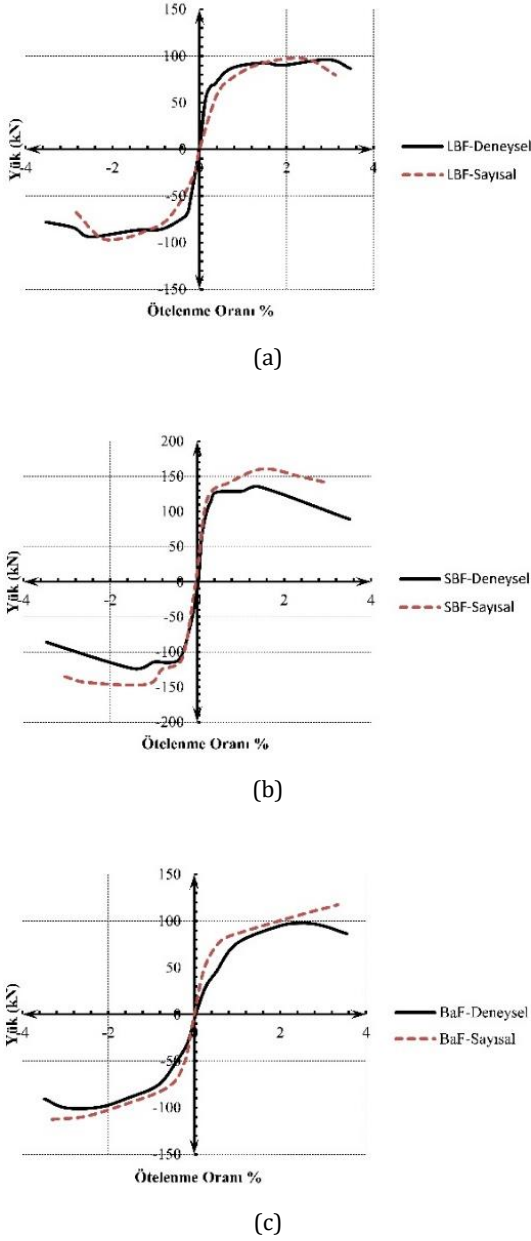
Şekil 7. SBF ve LBF'nin %2,0 (a, b) ve %3,0 (c, d) ötelenme oranı için çatlak genişliği cinsinden hasar dağılımı

Figure 7. Damage distribution of SBF and LBF in terms of crack width for 2.0% (a, b) and 3.0% (c, d) drift ratio

Tablo 1. Duvar-Duvar arayüzü (Coulomb Sürtünme Modeli) için model parametreleri

Table 1. Model parameters for Wall-Wall interface (Coulomb Friction Model)

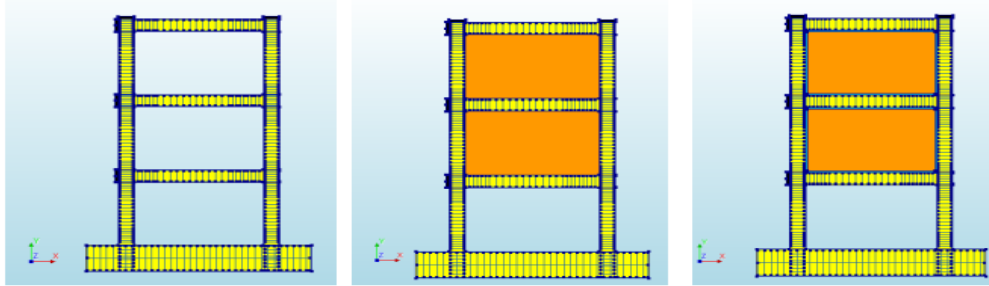
	Y yönü	X yönü
Normal Rijitlik (N/mm <sup>3</sup> )	6000	30
Kayma Rijitliği (N/mm <sup>3</sup> )	30	6000
Sürtünme Açısı	30°	30°
Genişleme Açısı	0	0



Şekil 8. Sayısal ve deneysel zarf eğrilerinin karşılaştırılması

Figure 8. Comparison of numerical and experimental envelope curves

#### 4. Üç Katlı Çerçeve Modellerinin Analizleri



Şekil 9. (a) Dolgunsuz (BaF3), (b) 2. ve 3. katları geleneksel dolgu duvarlı (SBF3) ve (c) 2. ve 3. katları kayar dolgu duvarlı (LBF3) çerçeve modelleri

Figure 9. Frame models with (a) unfilled (BaF3), (b) conventional infill walls (SBF3) on the 2nd and 3rd floors, and (c) sliding infill walls (LBF3) on the 2nd and 3rd floors

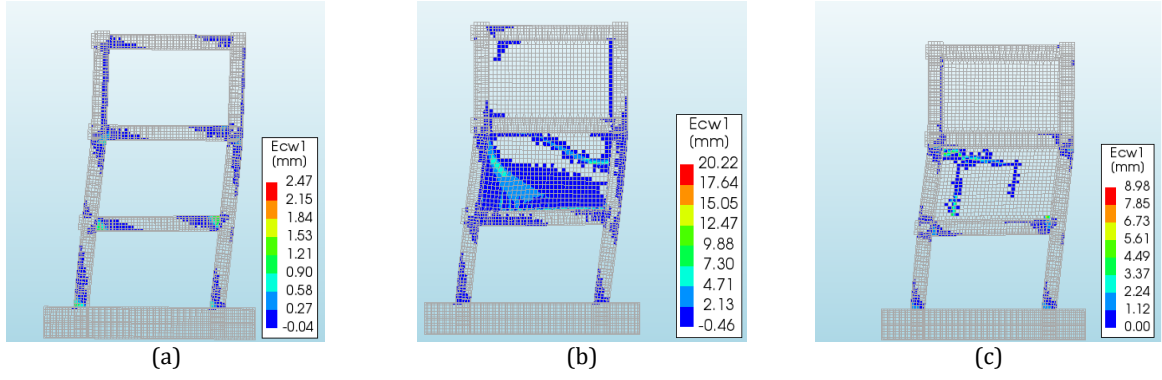
Elde edilen kalibre edilmiş model parametreleri kullanılarak aynı çerçeve açıklığına ve kat yüksekliğine sahip üç katlı tek açıklıklı betonarme çerçeve modelleri (a) dolgunsuz (BaF3), (b) yalnızca 2. ve 3. katı geleneksel dolgu duvarlı (SBF3) ve (c) yalnızca 2. ve 3. katı kayar dolgu duvarlı (LBF3) olmak üzere üç farklı dolgu duvar düzeninde kurulmuş (Şekil 9) ve analiz edilmiştir. Üç katlı çerçeve modellerinde tüm kolonların üst ucundan eksenel yük kapasitelerinin %10'u mertebesinde eksenel basınç kuvveti uygulanmıştır. Ayrıca kat hizalarından uygulanan 1. mod şekliyle uyumlu yanal yer değiştirme yükleri altında doğrusal olmayan analizler tamamlanmış ve analiz sonucunda elde edilen hasar dağılımları Şekil 10'da sunulmuştur. Gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler kapsamında ikinci merbete etkileri dikkate alınmıştır. Analiz sonucunda üç katlı her bir çerçeve model için elde edilen kapasite eğrileri Şekil 11'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre zemin katı boş bırakılan geleneksel dolgu üç katlı model (SBF3) hasarın zemin katta yoğunlaşarak yumuşak kat mekanizmasına eriştiği görülmüştür. Geleneksel dolgu model kayar duvar özellikleri tanımlanmış modele (LBF3) kıyasla belirgin olarak daha yüksek şekil değiştirmeler ve dolayısıyla hasar göstermiştir. Kayar duvarlı LBF3 modeliyle elde edilen şekil değiştirmeler tüm katları boş çerçevenin sonuçlarına yakın olarak elde edilmiş, LBF3 modelinde zemin katın dolgunsuz bırakılmasının olumsuz etkisinin sınırlı kaldığı görülmüştür. Böylece önerilen yapım tekniğinin kullanımı ile yumuşak kat mekanizmasının olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılacağı görülmüştür.

Tablo 2. Beton malzemesi model parametreleri

Table 2. Concrete material model parameters

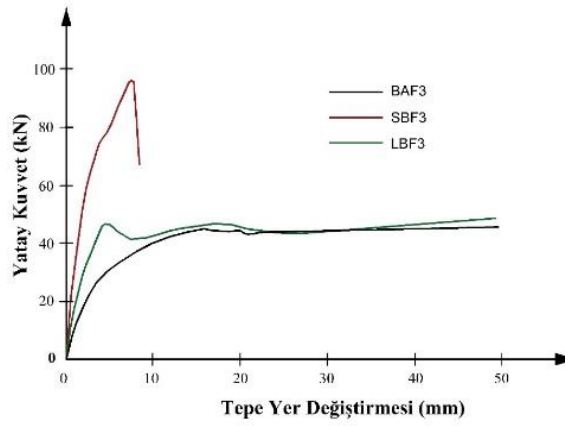
Concrete Total Crack Strain Model (TCSM) [20]	
Elastisite Modülü	28000 MPa
Poisson Oranı	0,2
Yoğunluk	2400kg/m <sup>3</sup>
Çatlak Oryantasyonu	Rotation
Çatlak Bant Genişliği	Rots
Çekme Davranışı/CEB FIB MODEL Code 2010 [21]	
Çekme Dayanımı	2,21 MPa
Mode-I kırılma enerjisi	125,17 N/m
Basınç Davranışı: Maekawa Concrete Model	
Basınç Dayanımı	20 MPa





**Şekil 10.** (a) BaF3, (b) SBF3 ve (c) LBF3 modellerine ait çatlak genişliği cinsinden hasar dağılımları

**Figure 10.** Damage distributions in terms of crack width for (a) BaF3, (b) SBF3, and (c) LBF3 models



**Şekil 11.** Üç katlı dolgu duvarsız çerçeve (BAF), standart dolgu duvarlı çerçeve (SBF) ve kayar dolgu duvarlı çerçeve (LBF3) modellerinin kapasite eğrileri

**Figure 11.** Capacity curves of three-storey frame without infill walls (BAF3), frame with standard infill walls (SBF), and frame with sliding infill walls (LBF3)

**Tablo 3.** Tuğla birimlerin model parametreleri

**Table 3.** Model parameters of brick units

Concrete Total Crack Strain Model (TCSM)	
Elastisite Modülü	1100 MPa
Poisson Oranı	0,2
Yoğunluk	1800kg/m <sup>3</sup>
Çatlak Oryantasyonu	Rotating
Çatlak Bant Genişliği	Rots
Çekme Davranışı/CEB FIB MODEL Code 2010	
Çekme Dayanımı	0,2 MPa
Mode-I kırılma enerjisi	0,02 N/m
Basınç Davranışı: Maekawa Concrete Model	
Basınç Dayanımı	1,1 MPa

## 5. Sonuç

Bu çalışmada daha önce test edilen dolgulu ve dolgusuz çerçeve numunelerini temsil eden doğrusal olmayan iki boyutlu sonlu elemanlar modelleri hazırlanmış ve deneysel sonuçlar kullanılarak sayısal modellerin parametreleri kalibre edilmiştir. Sayısal analizler sonucunda elde edilen hasar dağılımı, yük-

ötenme zarf eğrileri ve deney sonuçları kabul edilebilir yakınlıkta simüle edilmiştir. Elde edilen model kalibrasyon parametreleri kullanılarak farklı dolgu durumlarına sahip üç katlı çerçeveler analiz edilmiştir. Bu çerçeve modelleri ülkemizde ve komşu ülkelerde sıklıkla karşılaşıldığı gibi zemin katı dolgu duvarsız, üst katları ise dolgu duvarlı olacak şekilde kurulmuştur. Bu durum geleneksel tuğla duvar kullanılması halinde zemin katın ötelenme talebini artırmakta ve yumuşak kat mekanizması oluşma potansiyelini artırmaktadır. Nitekim yapılan sayısal analizler sonucunda elde edilen hasar dağılımlarında zemin katı boş geleneksel dolgulu modelde boş çerçeve ve kayar dolgulu çerçeve modellerine göre belirgin şekilde daha yüksek şekil değiştirme talepleri oluşmuştur. Benzer şekilde düzlem içi rijitliği daha düşük olan kayar dolgu duvar tanımlanarak analiz edilen üç katlı modellerde ise şekil değiştirmeler tüm katları dolgusuz çerçevenin sonuçlarına yakın elde edilmiş, bu modelde zemin katın dolgusuz bırakılmasının olumsuz etkisinin sınırlı kaldığı ve yumuşak kat oluşma potansiyelini azalttığı görülmüştür.

## Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## Yazar katkılarının beyanı

Yazar 1: Analiz ve yorum, Literatür taraması, Eleştirel inceleme

Yazar 2: Fikir/Kavram, Denetleme/Danışmanlık, Eleştirel inceleme

Yazar 3: Analiz ve yorum, Eleştirel inceleme, Yazım

## Kaynaklar

- [1] Rodrigues, H., Varum, H., and Costa, A., 2010. Simplified Macro-Model for Infill Masonry Panels, *Journal Earthquake Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp 390-416
- [2] Mohammadi, M., and Akrami, V., 2010. Application of Frictional Sliding Fuse in Infilled Frames, Fuse Adjustment and Influencing Parameters, *Structural Engineering Mech*, Vol. 36, No. 6, pp 715-727
- [3] Dimova, S.L. and Negro, P., 2005. Seismic Assessment of an Industrial Frame Structure Designed According to Eurocodes. Part 1: Experimental Tests and Their Numerical Simulation, *Eng Struct*, Vol. 27, pp 709-723
- [4] Yan, P.L., Sun, B.T., and Zhang, H.Y., 2014. Seismic damage to RC frame teaching building in Lushan MS7.0 Earthquake, *China Civil Eng J*, Vol. 47, pp 24-28
- [5] Ricci, P., De Risi, M.T., Verderame, G.M., Manfredi, G., 2013. Influence of Infill Distribution and Design Typology on Seismic Performance of Low- and Mid-Rise RC Buildings, *Bull Earthq Eng*, Vol. 11, pp 1585-1616
- [6] Hashemi, A., and Mosalam, K.M., 2007. Seismic Evaluation of Reinforced Concrete Buildings Including Effects of Infill Masonry Walls, *Pacific Earthquake Engineering Research Center-PEER, USA*, No: 100, 268 p.
- [7] Negro P. and Verzeletti G., 1996. Effect of Infills on the Global Behavior of RC Frames: Energy Considerations from Pseudodynamic Tests, *Earthq Eng Struct Dyn*, Vol. 25, pp 753-773
- [8] Negro, P., Colombo, A., 1997. Irregularities Induced by Nonstructural Masonry Panels in Framed Buildings, *Eng Struct*, Vol. 17, No.7, pp 576-585
- [9] Dolsek, M., and Fajfar, P., 2008. The Effect of Masonry Infills on The Seismic Response of a Four-Storey Reinforced Concrete Frame: A Deterministic Assessment, *Eng Struct*, Vol. 30, pp 1991-2001
- [10] Stavridis, A., Shing, P.B., 2010. Finite Element Modeling of Nonlinear Behavior of Masonry Infilled RC Frames, *J Struct Eng*, Vol. 136, No. 3 , pp 285-296
- [11] Kaushik, H.B., Rai, D.C., Jain, S.K., 2009. Effectiveness of Some Strengthening Options for Masonry-Infilled RC Frames with Open First Story, *J Struct Eng*, Vol. 135, No. 8, pp 925-937
- [12] Misir, I.S., Ozcelik, O., Girgin, S.G., and Kahraman, S., 2012. Experimental Work on Seismic Behavior of Various Types of Masonry Infilled RC Frames, *Struct Eng & Mech*, Vol. 44, No. 6, December, pp 763-774
- [13] Misir, I.S., Ozcelik, O., Girgin, S.C., and Yucel, U., 2016. The Behavior of Infill Walls in RC Frames Under Combined Bidirectional Loading, *J Earthq Eng*, Vol. 20, No. 4, pp 559-586
- [14] Misir, I.S., 2015. Potential Use of Locked Brick Infill Walls to Decrease Soft-Story Formation in Frame Buildings, *J Perform Constr Facil*, Vol. 29, No. 5, 04014133
- [15] DIANA FEA BV. DIANA Finite Element Analysis, User's Manual release 10.3. Delft, The Netherlands.
- [16] Yakut, A., Sucuoğlu, H., Binici, B., Canbay, E., Donmez, C., İlki, A., ... & Ay, B. Ö., 2021. Performance of structures in İzmir after the Samos Island earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-26.
- [17] Maekawa, K., Okamura, H., & Izumo, J., 1987. Reinforced concrete plate element subjected to cyclic loading, *IABSE Colloquium Delft*, August, 575-590.
- [18] DIANA User's Manual Release 10.1 [www.dianafea.com](http://www.dianafea.com)
- [19] Menegotto, M. and Pinto E. 1973. Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behaviour of Elements Under Combined Normal Force and Bending. *IABSE Symposium on the Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads*. Lisbon, Portugal.
- [20] Ngekpe B., 2016. Application of Total-Strain Crack Model in Finite Element Analysis for Punching Shear at Edge Connection, vol. 06.
- [21] FIB, in: *fib Model Code for Concrete Structures 2010*, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, 2013, <https://doi.org/10.1002/9783433604090>.
- [22] Preti, M., Bettini, N., and Plizzari, G., 2012. Infill walls with sliding joints to limit infill-frame seismic interaction: Large-scale experimental test, *Journal of Earthquake Engineering* 16(1), 125-141.



## Çalışma Ortamında Çalışma Refahı Farkındalığını Artırma ve Strateji Geliştirme Üzerine Bir Araştırma

### A Research on Raising Work Well-Being Awareness and Developing Strategy in The Work Environment

Emre Yaşar <sup>\*</sup>, Muharrem Kemal Özfirat <sup>\*</sup>

Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE  
Sorumlu Yazar / Corresponding Author\*: emreyasar79@gmail.com

#### Öz

"İş yerinde refah" terimi, yıllar içerisinde literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır ve hem işçilerin sağlığı hem de işin verimliliği ve karlılığı açısından çok etkili olduğu konusunda geniş bir tanı vardır. İşyeri Refahı; çalışma ortamının, fiziksel ortamın kalitesi ve güvenliğinden, çalışanların işlerini nasıl hissettikleri, çalışma ortamları, çalışma ortamı ve iş organizasyonu ile ilgili tüm yönleriyle ilgilidir. İşyerinde refah için alınacak önlemlerin amacı, işçilerin güvenli, sağlıklı, memnun ve iş ile meşgul olmalarını sağlamak için İSG önlemlerini tamamlamaktır. Bu çalışmanın amacı, petrokimya ürünleri üreten bir fabrikada çalışan işçilere yönelik çalışma refahı ile ilgili farkındalığı arttırmak amacıyla yapılmıştır. İzmir ili Aliğa ilçesinde bulunan petrokimya üreten fabrikada çalışan tüm beyaz yakalı çalışanların evreni temsil ettiği varsayılmaktadır. Araştırmada veriler görüşme formunda bulunan soruların cevaplandırılmasıyla toplanmıştır. Çalışanların bu sorulara doğru cevap verdiği varsayılmıştır. Toplam 50 kişi ile çalışma tamamlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda odaklanılması gereken en önemli üç çalışma refahı konusu sırasıyla stres (%45,5), ergonomi (%37,3) ve sağlıklı çalışma ortamı (%31) olarak tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İş sağlığı, Çalışma Refahı, İş Güvenliği

#### Abstract

The term of wellbeing has been used extensively in the literature over the years, and there is a broad diagnosis that it is very effective in terms of both the health of workers and the productivity and profitability of the work. Workplace wellbeing concerns all aspects of the work environment such as safety&healty working environment, how employees feel their work, and the work organization. The aim of the measures to be taken for wellbeing in the workplace is to complete OHS measures to ensure that workers are safe, healthy, satisfied and engaged in the work. The aim of this study was to raise awareness about working welfare for workers working in a petrochemical factory. It is assumed that all white-collar employees working in the petrochemical factory in Aliğa, İzmir represent the universe. In the research, data were collected by answering the questions in the interview form. It is assumed that the employees answered these questions correctly. The study was completed with a total of 50 people. As a result of the study, the three most important work well-being issues to focus on were determined as stress (45.5%), ergonomics (37.3%) and a healthy working environment (31%), respectively.

**Keywords:** Occupational health, Work Welfare, Occupational Safety

#### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction

Well-being is a multifaceted phenomenon that is examined in many different disciplines and therefore defined in many different ways. Due to the plurality of definitions, well-being is often defined as the "catch-all category." This means that well-being encompasses not only material wealth or physical health but also includes spiritual, emotional, social, and many other dimensions. Thus, a holistic approach is needed to fully understand well-being. Workplace Well-being encompasses all aspects of working life, from the quality and safety of the physical environment to how employees feel about their jobs, their workspaces, the climate within the workplace, and the organization of work. The purpose of measures aimed at workplace well-being is to complement occupational health and

safety measures to ensure that employees feel secure, healthy, satisfied, and committed to their work. The well-being of employees is a significant factor in determining the long-term effectiveness of an organization.

According to Gallup's extensive Employee Engagement Survey conducted in the United States, individuals who are highly committed to their jobs have been found to have better health and are less likely to develop chronic illnesses compared to others. Implementing an effective Well-being Program in the company reduces absenteeism and inefficiency by approximately one-third.

In this study, a detailed field research has been conducted on increasing awareness of workplace well-being and developing strategies. The results have been shared.

### Materials and Methods

This study, which aimed at increasing awareness of workplace well-being among workers in a petrochemical factory, is a descriptive study. Researchers utilized a survey form developed by them to collect data for the research. The first section of the survey includes demographic questions aimed at determining the age, education level, gender, and marital status of the workers. The data in the study were collected by answering the questions in the interview form. It was assumed that the employees answered these questions correctly. Frequency, percentage, and chi-square analysis were used in analyzing the data within the scope of the research. SPSS28 software was utilized for data analysis.

### Results and Discussion

The most crucial aspect of workplace well-being lies in stress management, which is achieved through a combination of flexible working hours and location, a pleasant working environment, and effective workload planning. Further development of studies in this area is necessary to enhance coping mechanisms with stress. As the second aspect of workplace well-being, in addition

to existing studies in ergonomics, providing height-adjustable desks is recommended, along with conducting comprehensive risk assessments and organizing awareness training on ergonomics for all employees. The third aspect of workplace well-being focuses on creating a healthy working environment, which includes considerations for ventilation, noise, lighting, and thermal comfort. To reduce noise levels, suggestions include providing quiet rooms, small conversation areas, rest zones, and informal meeting spaces. As for the other aspect of workplace well-being, it encompasses promoting health through healthy eating, physical activity, smoking cessation, and social interaction.

Regarding healthy eating, it is recommended to provide a variety of light and nutritious food options and develop menus that support healthy eating habits. For physical activity, suggestions include establishing an onsite gym, organizing sports group activities and training sessions, and providing gym memberships.

### Conclusion

The following results were obtained from the study:

The most critical three aspects of workplace well-being that need to be focused on, in order of importance, are stress (45.5%), ergonomics (37.3%), and a healthy working environment (31%).

## 1. Giriş

İyi oluş, birçok farklı disiplinde incelenen ve bu nedenle birçok farklı şekilde tanımlanan çok yönlü bir olgudur. Tanımların çokluğuna bağlı olarak refah; "hepsini yakalama kategorisi" olarak tanımlanmıştır [1].

İyi olma halinin tanımlanmasında bir başlangıç noktası olarak "sağlık" kullanılması yaygın hale gelmiştir. Dünya Sağlık Örgütü'nün "Sağlık, fiziksel, zihinsel ve sosyal refah ve değil sadece hastalık veya sakatlığın olmaması" olarak tanımlamıştır. Bununla birlikte, tanımında belirsiz olan "iyi oluş" kavramını kullandığı ve zaman zaman ütopyik olarak eleştirilmiş olduğu için sağlığın tanımı da oldukça karmaşıktır [2].

Refah üzerine başka bir yaklaşım, Galvin ve Todres tarafından sunulmuştur. İyi oluşun -sağlık ve hastalıktan bağımsız olarak- mekansal, zamansal, kişiler arası, bedensel, ruh hali ve kişisel deneyim açısından deneyimlenebileceğini belirten "Konut-hareket kafesi"nden oluşan kavramsal çerçeveleri içermektedir. Refahın sağlıktan daha karmaşık olduğunu ve herhangi bir ortam veya rolle, örneğin iş yeri refahı veya öğrenci olmanın rolü ile sınırlı olmadığını gösteren belirtiler, tanımı refahın özüne odaklanmaktadır [3].

İyi oluşu "bireyin kendi sağlığıyla ilgili deneyimi" olarak tanımlayan Medin ve Alexanderson (2001)[4] tanımı başlangıç noktasını oluşturmuştur.

Harvard Business Review'da 2010 yılında "Wellbeing at Work" kavramını: "Çalışanların (ve kimi zaman ailelerinin) sağlık risklerini azaltıp hayat kalitelerini yükseltmelerini destekleyen, kişisel verimliliklerini arttıran ve firmanın karlılığını pozitif etkileyen davranışları benimseyip korumalarını destekleyen, organize ve işveren sponsorluğunda gerçekleşen programların bütünü" olarak tanımlamaktadır

Araştırma Şirketi Gallup'un ABD'de yaptığı çok geniş kapsamlı Çalışan Bağlılığı Araştırması'na göre, işlerine bağlılıkları yüksek olan kişilerin sağlıklarının diğerlerine göre daha iyi ve kronik hastalıklara yakalanma olasılıklarının da daha düşük olduğu

belirlenmiştir. Etkili bir Wellbeing Programının şirkette uygulanması, işe gelinmeyen günleri ve verimsizliği yaklaşık 1/3 oranında azaltmaktadır.

İşyeri Refahı, fiziksel ortamın kalitesi ve güvenliğinden, çalışanların işleri, çalışma ortamları, işyerindeki iklim ve iş organizasyonu hakkında nasıl hissettiklerine kadar çalışma yaşamının tüm yönleriyle ilgilidir. İşyeri refahına yönelik önlemlerin amacı, çalışanların güvenli, sağlıklı, memnun ve işe bağlı olmalarını sağlamak için İSG önlemlerini tamamlamaktır. Çalışanların refahı, bir kuruluşun uzun vadeli etkinliğini belirlemede önemli bir faktördür. Birçok çalışma, üretkenlik seviyeleri ile işgücünün genel sağlık ve esenliği arasında doğrudan bir bağlantı olduğunu göstermektedir [5].

İşyeri refahı, iş maruziyetinin çalışanlar üzerindeki etkileri (meslek hastalıkları) hakkında ilk yazanlardan biri olduğuna inanılan ve çalışan refahını artırmak için önleyici tedbirler alma olasılıkları ile ilgilenen İtalyan Doktor Bernardini Ramazzini (1633-1714) ile başlamaktadır. Ramazzini'nin ölümünden sonra Sanayi Devrimi ile birçok yeni sağlık sorunu ve iş kazalarının başlaması, işin yeniden biçimlendirilmesi ve sistematik hale getirilmesini olanak sağlamıştır.

1810 yılında Welsh sosyal reformcusu Robert Marcus Owen, işgücünün refahını korumaya yardımcı olmak için 10 saatlik bir iş günü önermiştir. 1817'de 8 saatlik işgünü için daha agresif bir önlem aldı ve "sekiz saatlik emek, sekiz saatlik kendine vakit ayırma, sekiz saatlik dinlenme" ifadesini kullanmıştır. [6].

1832 yılında Charles Turner Thackrah, sanayi çalışanlarının sağlık sorunlarını ilk defa kaleme almıştır. Buna göre, Thackrah'ın kitabı, çalışanların refahını artırma arayışında öncü bir çalışma olarak görülmektedir. Thackrah kitabında, "İstihdamın kötülüğü tesadüfi bir aşırılıklardan biridir" [7].

Bu kayda değer kilometre taşlarına rağmen, işyerinde refah, şirketlerin öncelikle alkolizm ve zihinsel sağlık sorunlarına odaklanan refah müdahaleleri sunmaya başladığı 1950'lerde Çalışan Yardım Programlarının (EAP) ortaya çıkmasına kadar genellikle kuruluşlar için bir düşüncedir [8].



Reardon'a (1998) göre, gerçek işyeri refah programları gerçekte 1970'lerin ortasına kadar literatürde bulunmamaktaydı. Bu süre zarfında, sağlık hizmetlerinden mali sorumlulukta, hükümetten işverene doğru algılanan bir değişim olmuştur. Şantiye refahının gelişimi öncelikle maliyet kontrolüyle desteklenmeye başlanmıştır [9].

Aynı zamanda, 1970'lerin sonunda gelişen iş sağlığı ve güvenliği hareketi ve şantiye sağlığını geliştirme hareketinin faaliyetleri ile de ilişkili olmaktadır [10].

Greiner [11] (1987), bu dönemde şantiyede sağlıklı yaşamın ortaya çıkmasının arkasındaki nedenleri belirtmektedir:

- Zindeliği destekleyen genel bir kültür değişimi
- Çalışanların sağlıksız alışkanlıklarının maliyetini gösteren yeni araştırma bulguları
- Washington Sağlık ve Amerika Sağlık Konseyleri İş Grubu gibi yeni kurulan işyeri sağlığını geliştirme grupları.

Ayrıca, 1974 yılında, çalışan sağlığı için artan endişenin bir başka göstergesi olan Çalışan Emeklilik Gelir Güvenliği Yasası (ERISA) kurulmuştur. Bu planlardaki bireylere koruma sağlamak için özel sektörde en gönüllü olarak belirlenen emeklilik ve sağlık hizmetleri planları için minimum standartları belirlenmektedir [12].

Büyük kurumsal şantiye sağlık programlarının prototipi olarak bilinen Johnson'ın Yaşam İçin Yaşam programı 1979'da başlatıldı. Program, her bir kişinin aktivite düzeyleri ve vücut yağları hakkında bilgi toplamak amacıyla bir anket ve fiziksel bir değerlendirme içermektedir. Şirket daha sonra risk davranışlarını kontrol etmeye destek vermiştir. Örneğin; kilo kontrolü, beslenme ve stres yönetimi konularında farkındalık projeleri düzenlemiştir [13].

1980 yılında, ABD'ye yeni bir siyasi yönetimin gelmesiyle birlikte, sağlığı geliştirme odağı federal düzeyde kaybedilmiştir [11].

Bununla birlikte, işyerinde sağlık programları 1980'lerin başında akademik literatürde görünmeye başlamıştır. Bu zamanın araştırmaları esas olarak fiziksel uygunluk çabalarının işçilerin sağlığı ve performans üzerindeki etkilerinin tartışılmasıdır (12). 1982 yılında İş Sağlığı Dergisi, işyerinde sağlık programlarının, devamsızlığı ve hastalıkla ilgili diğer maliyetleri nasıl azaltabileceğine dair araştırmalar ve fitness merkezlerinin potansiyel olarak en iyi yetenekleri nasıl çekebileceğini tartışmaktadır [12].

Çalışan yardım programlarının dışında, 1980'lerde Amerika Birleşik Devletleri'ndeki işyeri sağlık programları, diğer sağlık boyutlarını göz ardı ederken öncelikle sağlığın fiziksel yönüne odaklanmış gibi görünmektedir. 1980'lerin sonunda şirketler, daha kapsayıcı bir işyeri sağlık stratejisinin bir parçası olarak psikolojik iyi olma konularını ele almaya başlamışlardır ve çalışanların ruh sağlığını vurgulayan bir girişim başlatılmıştır. Amacı, işle ilgili akıl sağlığı bozuklukları (özellikle stresle ilişkili hastalıklara odaklanmış) konusunu ele almaktır. Bunu 1991 yılında Ulusal Ruh Sağlığı Enstitüsü tarafından başlatılan başka bir girişim olan İşyerinde Depresyonu Yönetmek izlemiştir [9].

1990'larda federal hükümet, Sağlıklı İnsanlar 2000 adlı bir girişim başlatmıştır ve 50 ya da daha fazla çalışanı olan işverenlerin %75'inin sağlığa fayda sağlaması için sağlığı geliştirme hizmetleri sunmasını önermiştir [9].

Şantiyedeki sağlıklı yaşamın avantajlarına dair kanıtlar az sayıda bulunmaktadır; bununla birlikte, işyerinde sağlığın teşviki ve geliştirilmesinin çalışanlar üzerinde olumlu bir etki yaratarak bir şirkete fayda sağladığı inancı, bu programları daha geniş çapta

desteklemeye başlayan yöneticiler arasında popüler bir kavram haline gelmiştir. Bu dönemde, sağlıklı yaşam ve sağlığı geliştirme programları genellikle üç seviyeye ayrılmıştır [13]:

- Birinci seviye, farkındalığa yönelik uygulamalar (örn. Sınıflar, posterler, sağlık fuarları)
- İkinci seviye, yaşam tarzı ve davranış değişikliği ile ilgili (alışkanlık değişimini destekleyecek eğitim - bu programlar genellikle 12 haftaya kadar sürdü) programlar,
- Üçüncü seviye, çevreyi hedefleyen çalışmalar (bu programların zaman sınırı yoktu ve çalışma ortamını örgütsel yapı ve artan bilgi yoluyla değişiklikleri desteklemeye teşvik etti)

1996 yılında Pender'ın Sağlığını Geliştirme Modeli, şantiye sağlık programlarının geliştirilmesine rehberlik etmiştir [9]. Pender Modeli, bireyin bütünsel bir görüşünü benimsemiş ve sağlığın fiziksel boyutunun ötesine geçmiştir. Tersinir davranışları hedef aldı ve kuruluşlara birlikte çalışacakları bir çerçeve oluşturmuştur.

2000 yılında, ABD Sağlık ve İnsan Hizmetleri Bakanlığı, Sağlıklı İnsanlar 2000 - Sağlıklı İnsanlar 2010 programının yeni bir versiyonunu yayınlamıştır. Yeni program, öncülüne benzer bir hedefe sahiptir: 50 veya daha fazla çalışanı olan şantiyelerin %75'ini hedeflemiştir. 5 temel unsurdan oluşan kapsamlı bir sağlığı geliştirme planına sahip olup; (a) sağlık eğitimi, (b) destekleyici sosyal ve fiziksel çalışma ortamı, (c) programın entegrasyonu idari yapı, (d) ilgili programlar (örneğin işçiler için yardım) ve (e) tarama programlarından oluşmaktadır [14].

Son on beş yıl içinde işyerlerinde sağlıklı yaşam programları öne çıkmaktadır. Bu programlar, sağlık bilgilerini, danışmanlık ve fitness hizmetlerini sunarak, çalışanların iyi kalmasını teşvik etmek için para ödülleri kullanılmıştır [15].

Özellikle, ABD çalışanların refahını sağlamak için önemli adımlar atmıştır. Maruziyetteki bu artışla birlikte, büyük işletmelerin sağlık programlarının etkinliği ve maliyet etkinliğine verdiği ilgi artmıştır. Ancak küçük ve orta ölçekli işletmeler için çok az araştırma bulunmaktadır. Ne yazık ki, büyük ölçekli kuruluşların işyerinde sağlıkla ilgili verilerinin çoğu, KOBİ'lerin daha küçük bütçeleri, farklı iş stratejileri ve farklı çalışan değerlendirmeleri nedeniyle KOBİ'lere genelleştirilememiştir [14].

Ayrıca, KOBİ'lerin bu tür programları sunabilmeleri için hala engeller bulunmaktadır. Küçük şirketlerin özellikle sağlık programlarını sunmakta zorlandığı görülmektedir [16]. Bir araştırmaya göre, küçük işletmelerin %7'sinden azı sağlık programları sunmaktadır [17].

Hughes vd, (2011) [14] küçük ve orta ölçekli şirketlerde sağlığı geliştirme programlarını engelleyen çeşitli faktörleri tanımlamaktadır. Birincisi, bu tür programların bir şirkete zaten finansal olarak aşırı yüklenmiş olabilecek ek maliyeti vardır. Zorunlu sağlık ve güvenlik düzenlemeleri genellikle gönüllü sağlığı geliştirme programlarına göre önceliklidir ve bu nedenle katılımcı işyeri sağlık programları ile ilgili tüm fikirler ortadan kalkmaktadır. Küçük şirketler genellikle birçok büyük şirkette işyeri sağlık programlarını başlatan bir sağlık ve güvenlik departmanından yoksun bulunmaktadır. Diğer bir faktör, küçük şirketlerin genellikle önleyici programlar için motivasyon olabilecek sağlık sigortası ve çalışanlara sağlanan faydaları sunamayacağı olmasıdır [14].

Burke (2006) [18] ayrıca, küçük şirketlerde şantiyedeki sağlıklı yaşam konusunda genellikle farkındalık ve anlayış eksikliği olduğunu ileri sürmektedir.

Bununla birlikte, küçük işletmelerde sağlıklı yaşam programlarının oluşturulması, büyük şirketlerde olduğundan

daha kolay hale getiren başka özellikler de bulunmaktadır. Bunlar arasında sağlığı geliştirme sağlayıcılarına daha kolay erişim sağlayan bürokratik taleplerin azaltılması; yönetim ve işçiler arasında daha iyi bağlantılar, daha kolay iletişim ve "ailenin bir parçası" olarak görülen işçilere karşı daha fazla empati ile yaklaşımın bulunmasından kaynaklanmaktadır [19-20].

## 2. Materyal ve Metot

Petrokimya üreten bir fabrikada çalışan işçilere yönelik çalışma refahı ile ilgili farkındalığı arttırmak amacıyla yapılan bu çalışma, tanımlayıcı bir çalışmadır.

İzmir ili Aliağa ilçesinde bulunan petrokimya üreten fabrikada çalışan tüm beyaz yakalı çalışanların evreni temsil ettiği varsayılmaktadır. Gönüllük esasına göre çalışmaya toplam 50 kişi katılmış ve 50 kişi ile çalışma yürütülmüştür. Araştırmaya katılan çalışanların 35'i erkek, 15'i kadındır. Bir diğer anlatımda grubun yaklaşık olarak %70'i erkeklerden, %30'u kadınlardan oluşmaktadır.

Medeni duruma göre çalışanların %60'ı (n= 30) evli, %40'ı (n= 20) bekârdır. Çalışanların yaşı, boyu, kilosu ve Beden Kitle İndeksi değerleri için ortalamaları sırasıyla 34.16, 174.42, 76.90 ve 25.07'dir.

Araştırmada veri toplamak amacıyla araştırmacılar tarafından geliştirilen bir anket formu kullanılmıştır. Anketin ilk bölümünde demografik sorulara yer verilmiştir. Bu sorularda çalışanların yaş düzeyi, öğrenim düzeyi, cinsiyetleri ve medeni durumlarını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Anketin ikinci bölümünde ise çalışanların refah düzeyini belirlemek amacıyla aşağıdaki sorulara yer verilmiştir.

Araştırma Soruları;

1. Katılımcılar çalışan refahı ile ilgili ne düşünmektedirler?
2. Katılımcıların çalışan refahı ile ilgili görüşleri cinsiyetlerine göre anlamlı farklılık göstermekte midir?
3. Katılımcıların çalışan refahı ile ilgili görüşleri medeni durumlarına göre anlamlı farklılık göstermekte midir?

### 2.1. Verilerin Toplanması ve Çözülmesi

Araştırmada veriler görüşme formunda bulunan soruların cevaplandırılmasıyla toplanmıştır. Çalışanların bu sorulara doğru cevap verdiği varsayılmıştır. Araştırma kapsamında verileri analiz etmede frekans, yüzde ve ki-kare analizi kullanılmıştır. Verilerin analizinde SPSS28 yazılımından yararlanılmıştır.

## 3. Bulgular

Bu bölümde çalışanların çalışan refahı ile ilgili düşüncelerine, çalışan refahı ile ilgili görüşleri cinsiyetlerine göre anlamlı farklılıklarının incelenmesi ve çalışan refahı ile ilgili görüşleri medeni durumlarına göre anlamlı farklılıkları incelenmiştir.

### 3.1. Çalışanların Çalışma Refahı Düşünceleri

Katılımcıların çalışan refahı ile ilgili ne düşünceleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 incelendiğinde B9 ve B23 (%100) sorularına çalışanların tamamı evet yanıtını vermiştir. B3, B5, B6, B7, B10, B14 ve B24

sorularına çalışanların çoğunluğu (%50 ve üzeri) hayır yanıtını verdiği görülmektedir. B1 sorusuna çalışanların çoğu (%42) bilmediğini ifade etmiştir. B2, B4, B8, B11, B12, B13, B15, B16, B17, B18, B19, B20, B21, B22, B25 sorularına çalışanların çoğunluğu (%50 ve üzeri) evet yanıtı verdiği görülmektedir.

### 3.2. Katılımcıların çalışan refahı ile ilgili görüşlerinin cinsiyetlerine göre incelenmesi

Katılımcıların çalışan refahı ile ilgili görüşlerinin cinsiyetlerine göre incelenmesi Tablo 2'de verilmiştir.

Araştırmaya katılan çalışanların cinsiyetlerine göre çalışma refahı sorularına verilen cevapları Tablo 2'de yer verilmiştir. Kadın ve Erkek çalışanların tamamı (%100) B9 ve B23 sorularına evet yanıtını vermiştir. Kadın ve Erkek çalışanların B1 sorusunda %40 üzeri bilmediğini ifade etmiştir. Araştırmada yer alan B2, B4, B8, B11, B12, B13, B15, B16, B17, B18, B19, B20, B21, B22 ve B25 sorularına hem kadınlar hem erkeklerin çoğunluğu (%50 ve üzeri) evet yanıtını vermiştir. Araştırmada yer alan B3, B5, B6, B7, B10, B14, B24 sorularına hem kadınlar hem erkeklerin çoğunluğu (%50 ve üzeri) hayır yanıtını vermiştir. Beklenen değeri 5'ten küçük hücre sayısı %20'den fazla olduğu için ki-kare p değeri yorumlanamamıştır.

### 3.3. Katılımcıların çalışan refahı ile ilgili görüşlerinin medeni durumlarına göre incelenmesi

Katılımcıların çalışan refahı ile ilgili görüşlerinin medeni durumlarına göre incelenmesi Tablo 3'de verilmiştir.

Araştırmaya katılan çalışanların medeni durumlarına göre çalışma refahı sorularına verilen cevapları Tablo 3'de yer verilmiştir. Bekar ve evli çalışanların tamamı (%100) B9 ve B23 sorularına evet yanıtını vermiştir. Araştırmada yer alan B2, B4, B8, B11, B12, B13, B15, B16, B18, B19, B20, B21, B22 ve B25 sorularına hem bekarlar hem evli çalışanların çoğunluğu (%50 ve üzeri) evet yanıtını vermiştir. Araştırmada yer alan B3, B5, B6, B7, B10, B24 sorularına hem bekar hem evli çalışanların çoğunluğu (%50 ve üzeri) hayır yanıtını vermiştir. B1 sorusu için çalışmaya katılan çalışanlardan bekârların %20'sinin evet, %25'inin hayır, %55'inin bilmiyorum; evlilerin ise %30'unun evet, %36,7'sinin hayır, %33,3'ünün bilmiyorum olarak yanıtladıkları görülmektedir. Gözlenen bu farkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla ki-kare testi yapılmıştır. Analiz sonucunda anlamlı farklılık olmadığı bulunmuştur (p> 0.05).

B17 sorusu için çalışmaya katılan çalışanlardan bekârların %55'inin evet, %25'inin hayır, %20'sinin bilmiyorum; evlilerin ise %56,7'sinin evet, %13,3'ünün hayır, %30'unun bilmiyorum olarak yanıtladıkları görülmektedir. Gözlenen bu farkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla ki-kare testi yapılmıştır. Analiz sonucunda anlamlı farklılık olmadığı bulunmuştur (p> 0,05).

B14 sorusu için çalışmaya katılan çalışanlardan bekârların %25'inin evet, %65'inin hayır, %10'unun bilmiyorum; evlilerin ise %53,3'ünün evet, %46,7'sinin hayır olarak yanıtladıkları görülmektedir. Beklenen değeri 5'ten küçük hücre sayısı %20'den fazla olduğu için ki-kare p değeri yorumlanamamıştır.

**Tablo 1.** Katılımcıların çalışan refahı ile ilgili düşünceleri**Table 1.** Participants' thoughts on employee welfare

Madde	İfadeler	Evet		Hayır		Bilmiyorum	
		n	%	n	%	n	%
B1	Ülkenizde psikososyal sorunları (stres) yönetmek için yasal bir gereklilik var mı?	13	26	16	32	21	42
B2	Fabrikada çalışanların stres düzeylerini azaltmak için esnek çalışma veya sosyal etkinlikler düzenlendi mi? (Örneğin; piknik, tiyatro, iftar yemeği vb.)	40	80	9	18	1	2
B3	Fabrikada çalışanların stres düzeylerini belirlemek amacıyla girişimlerde bulunuldu mu? (Örneğin: anket çalışması)	19	38	26	52	5	10
B4	Fabrikada, çalışanların stres düzeylerini azaltmalarına yardımcı olacak olanaklar bulunuyor mu? (Örneğin: danışmanlık hizmeti, afiş, poster)	27	54	18	36	5	10
B5	Fabrikada çalışanların düzenli egzersiz konusunda farkındalık eğitimleri yapıyor mu?	12	24	34	68	4	8
B6	Fabrikada çalışanlar için düzenli egzersiz programı sağlıyor mu? (Örneğin: öğlen arasında koşu, aerobik... vb.)	0	0	49	98	1	2
B7	Fabrikada çalışanların sağlıklı beslenme konusunda farkındalık eğitimleri yapıyor mu?	13	26	35	70	2	4
B8	Fabrikanın yemekhanesinde çıkan yemekler sağlıklı mı?	33	66	4	8	13	26
B9	Fabrikada, yemeklerde meyve çıkıyor mu?	50	100	0	0	0	0
B10	Fabrikada sigara kullanımını azaltmak amacıyla yapılan bir etkinlik oldu mu?	2	4	43	86	5	10
B11	Şirketinizde özel günlerinize değer veriliyor mu? (Örneğin; yaş günü, doğum vb.)	43	86	6	12	1	2
B12	Şirketiniz, aydınlatma düzeylerini düzenli olarak test ediyor mu?	29	58	4	8	17	34
B13	Fabrikanızda yeterli havalandırma yapıyor mu?	34	68	11	22	5	10
B14	Fabrikanızda bulunduğunuz yerde aşırı sıcak ve soğuk ile ilgili sorun yaşıyor musunuz?	21	42	27	54	2	4
B15	Fabrikanızda iş sağlığı ve güvenliği hakkında farkındalık eğitimleri yapıyor mu?	48	96	1	2	1	2
B16	Fabrikanızda ergonomi hakkında çalışmalar yapıyor mu?	41	82	6	12	3	6
B17	Fabrikanızın çalışma alanları için ergonomik risk değerlendirilmesi yapıyor mu?	28	56	9	18	13	26
B18	Şirketinizde çalışırken ihtiyaç duyulan ergonomik ekipmanlar sağlanıyor mu? (Örneğin; Laptop yükseltici, bel yastığı vb.)	44	88	6	12	0	0
B19	Yasal olarak gerekli olanlara ek olarak, fabrikanız tüm çalışanlar için sağlık kontrolleri sağlıyor mu?	46	92	1	2	3	6
B20	Fabrikanızda harici bir şirkete tıbbi / sağlık hizmetleri sağlıyor mu? (Örneğin; özel sağlık sigortası vb)	48	96	0	0	2	4
B21	Fabrika çalışanlarına düzenli odyometrik testler uygulanıyor mu?	47	94	0	0	3	6
B22	Fabrika çalışanlarına, yüksek düzeyde gürültüye maruz kalan çalışanlara işitme koruması (örn. Kulak tıkacı, kulak koruyucusu vb.) sağlıyor mu?	49	98	0	0	1	2
B23	Fabrikanızda tıbbi / sağlık hizmetleri sunmak için çalışan Hemşire veya Doktor var mı?	50	100	0	0	0	0
B24	Sağlıklı yaşam için kampanya düzenleniyor mu?	7	14	38	76	5	10
B25	Fabrikanızda koruyucu sağlık hizmeti olarak aşı uygulaması yapıyor mu?	38	76	5	10	7	14

**Tablo 2.** Katılımcıların çalışan refahı ile ilgili görüşlerinin cinsiyetlerine göre incelenmesi**Table 2.** Examining participants' views on employee welfare based on their genders

Madde		Kadın		Erkek		p
		n	%	n	%	
B1	Evnet	5	33,3	8	22,9	-
	Hayır	4	26,7	12	34,3	
	Bilmiyorum	6	40	15	42,9	
B2	Evnet	12	80	28	80	-
	Hayır	3	20	6	17,1	
	Bilmiyorum	0	0	1	2,9	
B3	Evnet	6	40	13	37,1	-
	Hayır	8	53,3	18	51,4	
	Bilmiyorum	1	6,7	4	11,4	

**Tablo 2.** Katılımcıların çalışan refahı ile ilgili görüşlerinin cinsiyetlerine göre incelenmesi (devam)**Table 2.** Examining participants' views on employee welfare based on their genders (cont.)

B4						
	Evet	8	53,3	19	54,3	-
	Hayır	6	40	12	34,3	
	Bilmiyorum	1	6,7	4	11,4	
B5						
	Evet	3	20	9	25,7	-
	Hayır	11	73,3	23	65,7	
	Bilmiyorum	1	6,7	3	8,6	
B6						
	Evet	0	0	0	0	-
	Hayır	15	100	34	97,1	
	Bilmiyorum	0	0	1	2,9	
B7						
	Evet	5	33,3	8	22,9	-
	Hayır	9	60	26	74,3	
	Bilmiyorum	1	6,7	1	2,9	
B8						
	Evet	9	60	24	68,6	-
	Hayır	2	13,3	2	5,7	
	Bilmiyorum	4	26,7	9	25,7	
B9						
	Evet	15	100	35	100	-
	Hayır	0	0	0	0	
	Bilmiyorum	0	0	0	0	
B10						
	Evet	0	0	2	5,7	-
	Hayır	14	93,3	29	82,9	
	Bilmiyorum	1	6,7	4	11,4	
B11						
	Evet	13	86,7	30	85,7	-
	Hayır	2	13,3	4	11,4	
	Bilmiyorum	0	0	1	2,9	
B12						
	Evet	9	60	20	57,1	-
	Hayır	1	6,7	3	8,6	
	Bilmiyorum	5	33,3	12	34,3	
B13						
	Evet	10	66,7	24	68,6	-
	Hayır	3	20	8	22,8	
	Bilmiyorum	2	13,3	3	8,6	
B14						
	Evet	6	40	15	42,9	-
	Hayır	8	53,3	19	54,3	
	Bilmiyorum	1	6,7	1	2,9	
B15						
	Evet	13	86,7	35	100	-
	Hayır	1	6,7	0	0	
	Bilmiyorum	1	6,7	0	0	



**Tablo 2.** Katılımcıların çalışan refahı ile ilgili görüşlerinin cinsiyetlerine göre incelenmesi (devam)**Table 2.** Examining participants' views on employee welfare based on their genders (cont.)

B16						
	Evet	10	66,7	31	88,6	-
	Hayır	4	26,7	2	5,7	
	Bilmiyorum	1	6,7	2	5,7	
B17						
	Evet	8	53,3	20	57,1	-
	Hayır	5	33,3	4	11,4	
	Bilmiyorum	2	13,3	11	31,4	
B18						
	Evet	13	86,7	31	88,6	-
	Hayır	2	13,3	4	11,4	
	Bilmiyorum	0	0	0	0	
B19						
	Evet	14	93,3	32	91,4	-
	Hayır	0	0	1	2,9	
	Bilmiyorum	1	6,7	2	5,7	
B20						
	Evet	13	86,7	35	100	-
	Hayır	0	0	0	0	
	Bilmiyorum	2	13,3	0	0	
B21						
	Evet	13	86,7	34	97,1	-
	Hayır	0	0	0	0	
	Bilmiyorum	2	13,3	1	2,9	
B22						
	Evet	15	100	34	97,1	-
	Hayır	0	0	0	0	
	Bilmiyorum	0	0	1	2,9	
B23						
	Evet	15	100	35	100	-
	Hayır	0	0	0	0	
	Bilmiyorum	0	0	0	0	
B24						
	Evet	2	13,3	5	14,3	-
	Hayır	12	80	26	74,3	
	Bilmiyorum	1	6,7	4	11,4	
B25						
	Evet	11	73,3	27	77,1	
	Hayır	2	13,3	3	8,6	
	Bilmiyorum	2	13,3	5	14,3	

**Tablo 3.** Katılımcıların çalışan refahı ile ilgili görüşlerinin medeni durumlarına göre incelenmesi**Table 3.** Examining participants' views on employee welfare based on their marital status

Madde		Bekâr		Evli		p
		n	%	n	%	
B1						
	Evet	4	20	9	30	0,315
	Hayır	5	25	11	36,7	
	Bilmiyorum	11	55	10	33,3	
B2						
	Evet	15	75	25	83,3	-
	Hayır	4	20	5	16,7	
	Bilmiyorum	1	5	0	0	
B3						
	Evet	8	40	11	36,7	-
	Hayır	9	45	17	56,7	
	Bilmiyorum	3	15	2	6,7	
B4						
	Evet	11	55	16	53,3	-
	Hayır	7	35	11	36,7	
	Bilmiyorum	2	10	3	10	
B5						
	Evet	4	20	8	26,7	-
	Hayır	14	70	20	66,7	
	Bilmiyorum	2	10	2	6,7	
B6						
	Evet	0	0	0	0	-
	Hayır	19	95	30	100	
	Bilmiyorum	1	5	0	0	
B7						
	Evet	7	35	6	20	-
	Hayır	12	60	23	76,7	
	Bilmiyorum	1	5	1	3,3	
B8						
	Evet	14	70	19	63,3	-
	Hayır	3	15	1	3,3	
	Bilmiyorum	3	15	10	33,3	
B9						
	Evet	20	100	30	100	-
	Hayır	0	0	0	0	
	Bilmiyorum	0	0	0	0	
B10						
	Evet	0	0	2	6,7	-
	Hayır	17	85	26	86,7	
	Bilmiyorum	3	15	2	6,7	
B11						
	Evet	19	95	24	80	-
	Hayır	1	5	5	16,7	
	Bilmiyorum	0	0	1	3,3	

**Tablo 3.** Katılımcıların çalışan refahı ile ilgili görüşlerinin medeni durumlarına göre incelenmesi (devam)**Table 3.** Examining participants' views on employee welfare based on their marital status (cont.)

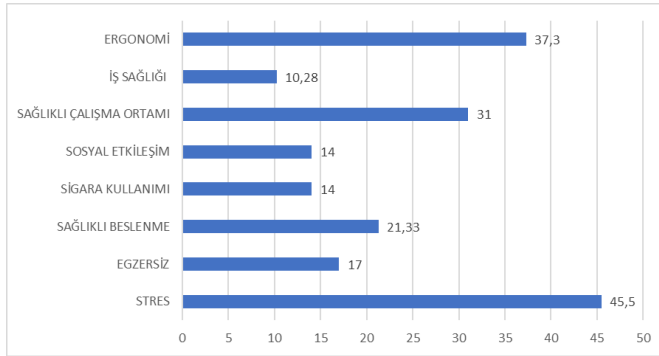
B12						
	Evet	12	60	17	56,7	-
	Hayır	1	5	3	10	
	Bilmiyorum	7	35	10	33,3	
B13						
	Evet	15	75	19	63,3	-
	Hayır	3	15	8	26,7	
	Bilmiyorum	2	10	3	10	
B14						
	Evet	5	25	16	53,3	-
	Hayır	13	65	14	46,7	
	Bilmiyorum	2	10	0	0	
B15						
	Evet	18	90	30	100	-
	Hayır	1	5	0	0	
	Bilmiyorum	1	5	0	0	
B16						
	Evet	16	80	25	83,3	-
	Hayır	3	15	3	10	
	Bilmiyorum	1	5	2	6,7	
B17						
	Evet	11	55	17	56,7	0,503
	Hayır	5	25	4	13,3	
	Bilmiyorum	4	20	9	30	
B18						
	Evet	18	90	26	86,7	-
	Hayır	2	10	4	13,3	
	Bilmiyorum	0	0	0	0	
B19						
	Evet	18	90	28	93,3	-
	Hayır	0	0	1	3,3	
	Bilmiyorum	2	10	1	3,3	
B20						
	Evet	18	90	30	100	-
	Hayır	0	0	0	0	
	Bilmiyorum	2	10	0	0	
B21						
	Evet	17	85	30	100	-
	Hayır	0	0	0	0	
	Bilmiyorum	3	15	0	0	
B22						
	Evet	20	100	29	96,7	-
	Hayır	0	0	0	0	
	Bilmiyorum	0	0	1	3,3	
B23						
	Evet	20	100	30	100	-
	Hayır	0	0	0	0	
	Bilmiyorum	0	0	0	0	

**Tablo 3.** Katılımcıların çalışan refahı ile ilgili görüşlerinin medeni durumlarına göre incelenmesi (devam)**Table 3.** Examining participants' views on employee welfare based on their marital status (cont.)

B24						
	Evet	2	10	5	16,7	-
	Hayır	16	80	22	73,3	
	Bilmiyorum	2	10	3	10	
B25						
	Evet	16	80	22	73,3	-
	Hayır	2	10	3	10	
	Bilmiyorum	2	10	5	16,7	

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Yapılan çalışma sonucunda aşağıdaki sonuç elde edilmiştir. Odaklanılması gereken en önemli üç çalışma refahı konusu sırasıyla stres (%45,5), ergonomi (%37,3) ve sağlıklı çalışma ortamı (%31) olarak tespit edilmiştir.

**Şekil 1.** Araştırma Sonucunda Çalışma Refahı ile İlgili Odaklanılması Gereken Konular**Figure 1.** Key Areas of Focus Regarding Employee Welfare Based on Research Findings

En önemli çalışma refahı konusu olarak stres yönetiminde esnek çalışma zamanı ve yeri, güzel bir çalışma ortamı ve iyi bir iş yükü planlamasının kombinasyonu, stresle baş etmenin anahtarı olup bu alanda yapılan çalışmaların geliştirilmesi gereklidir. İkinci çalışma refahı konusu olarak ergonomi alanında var olan çalışmalara ilave olarak dikey hareketli çalışma masaları sağlanmalı ayrıca daha kapsamlı risk değerlendirmesi yapılarak tüm çalışanlara ergonomi hakkında farkındalık eğitimleri düzenlenmesi önerilmektedir. Üçüncü çalışma refahı konusu olarak sağlıklı çalışma ortamını işyerindeki havalandırma, gürültü, aydınlatma ve termal konfor konularını içermektedir. Gürültüyü azaltmak için sessiz odalar, küçük sohbet odaları, dinlenme alanları ve resmi olmayan toplantı alanları sağlanması önerilmektedir.

Diğer çalışma refahı konusu olarak iş sağlığını sağlıklı beslenme, fiziksel aktivite, sigara kullanımı ve sosyal etkileşim konularını içermektedir. Sağlıklı beslenme konusunda daha çeşitli, hafif yiyecekler ve sağlıklı beslenmeyi destekleyecek menü oluşumları sağlanmalıdır. Fiziksel Aktivite açısından işyerinde spor salonu, spor grubu aktiviteleri ve eğitimleri, spor salonu üyeliği sağlanması önerilmektedir.

#### Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Fen ve Mühendislik Bilimleri Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulundan 04.07.2022 tarihli, 306596 sayılı etik kurul izni alınmıştır.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Yazar katkılarının beyanı

İlk yazar literatür taraması, makale yazımı, veri toplama, deney tasarımı ve analizlerin gerçekleştirilmesi konularında görev almış, ikinci yazar ise fikir oluşturma ve eleştirel inceleme gerçekleştirmiştir.

#### Kaynaklar

- [1] Cameron, E., Mathers, J., Parry, J. 2006. Health and wellbeing: Questioning the use of health concepts in public health policy and practice. *Critical Public Health*, 16(4), 347-354. DOI: 10.1080/09581590601128166
- [2] Larson, J. S. 1999. The conceptualization of health. *Medical Care Research and Review*, 56(2), 123-136. DOI: 10.1177/107755879905600201
- [3] Galvin, K., Todres, L. 2011. Kinds of well-being: A conceptual framework that provides direction for caring. *International Journal of Qualitative Studies on Health and Well-Being*, 6(4), 10362. DOI: 10.3402/qhw.v6i4.10362
- [4] Medin, J., Alexanderson, K. 2001. Health and health promotion – A literature study. Lund, Swedish: Studentlitteratur.
- [5] ILO, 2019. International Labor Organisation
- [6] Donnachie, I. 2000. Robert Owen: Owen of New Lanark and New Harmony. Edinburgh: Tuckwell Press.
- [7] Thackrah, C. T. 1832. The effects of the principal arts, trades, and professions, and of civic states and habits of living, on health and longevity: With a particular reference to the trades and manufacturers of Leeds, and suggestions for the removal of many of the agents, which produce diseases, and shorten the duration of life. From the London ed., with improvements. London: Porter.
- [8] Owens, D. M. 2006. EAPs for a diverse world: Employers that provide culturally competent employee assistance programs show employees they care. *HR Magazine*, 51(10), 91-96.
- [9] Reardon, J. 1998. The history and impact of worksite wellness. *Nursing Economics*, 16(3), 117-121.
- [10] DeJoy, M., Southern, J. 1993. An integrative perspective on worksite health promotion. *Journal of Occupational Medicine*, 35(12), 1221-1229.
- [11] Greiner, P. 1987. Nursing and worksite wellness: Missing the boat. *Holistic Nursing Practice*, 2(1), 53-60.
- [12] Call, C., Gerdes, R., Robinson, K. 2009. Health and wellness research study: Corporate and worksite wellness programs: A research review focused on individuals with disabilities (Government Contract Number: DOLU089428186). Gaithersburg, MD: Social Dynamics, LLC. Retrieved from: <http://www.dol.gov/odep/research/CorporateWellnessResearchLiteratureReview.pdf>
- [13] Pencak, M. 1991. Workplace health promotion programs: An overview. *The Nursing Clinics of North America*, 26(1), 233-240. DOI: 10.1016/S0029-6465(22)03020-1
- [14] Hughes, M. C., Patrick, D. L., Hannon, P. A., Harris, J. R., Ghosh, D. L. 2011. Understanding the decision-making process for health promotion programming at small to midsized businesses. *Health Promotion Practice*, 12(4), 512. DOI: 10.1177/1524839909349162



- [15] Wieczner J. 2013. Your company wants to make you healthy. The Wall Street Journal. Retrieved from <http://www.wsj.com/articles/SB10001424127887323393304578360252284151378>
- [16] McPeck, W., Ryan, M., Chapman, L. S. 2009. Bringing wellness to the small employer. *American Journal of Health Promotion*, 23(5), 1-10. DOI: 10.4278/ajhp.23.5.tahp
- [17] Carter, M., Gaskins, S., Shaw, L. 2005. Employee wellness program in a small rural industry: Employee evaluation. *AAOHN Journal*, 53(6), 244-248.
- [18] Burke, B. 2006. Public policy options for small employer health insurance. *North Carolina Medical Journal*, 67(3), 222-224.
- [19] Divine, R. 2005. Determinants of small business interest in offering a wellness program to their employees. *Health Marketing Quarterly*, 22(3), 43-58. DOI: 10.1300/J026v22n03\_04
- [20] Yörük, E., Çam, N. F., Öztürk, B. C. 2021. Güvenli Çalışma Ortamları İçin Radyasyon Riskinin Değerlendirilmesi. *DEUFMD*, 23(68), 357-367.



## Termal Değişimlerin Tinkal Katkılı Kum-Bentonit ve Zeolit-Bentonit Karışımlarının Kayma Dayanımına Etkisi

### Effect of Thermal Changes on the Shear Strength of Tincal Added Sand-Bentonite and Zeolite-Bentonite Mixtures

Sukran Gizem Alpaydin <sup>1\*</sup>, Yeliz Yukselen Aksoy <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı, İzmir, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author\*: alpaydin.sukrangizem@ogr.deu.edu.tr

#### Öz

Atık depolama alanları ve enerji geo-yapılarında geçirimsiz mühendislik bariyeri olarak kullanılan bentonit içerikli karışımlar zamanla termal etkiler altında değişimlere maruz kalabilirler. Zeminlerin, bu termal değişimler altında mühendislik özelliklerinin bozulmadan uzun süre korunması enerji geo-yapısının performansı ve çevre ve insan sağlığı için oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında, sıcaklığın (25 ve 80 °C) ve sıcaklık döngülerinin sıkıştırılmış kum-bentonit ve zeolit-bentonit karışımlarının kayma dayanımı davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca sıcaklığa karşı direnci yüksek bir bor minerali olan tinkal, karışımlara ilave edilmiş ve bu katkının yüksek sıcaklıklarda karışımların kayma davranışına etkisi incelenmiştir. Karışımların kayma dayanımı genel olarak artan sıcaklıkla %5-%15 aralığında artış göstermiştir. Ayrıca tinkal ilavesi özellikle kum-bentonit karışımları için kayma dayanımı açısından faydalı bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Bentonit, Tincal, Kesme kutusu, Kayma dayanımı, Yüksek sıcaklık

#### Abstract

Bentonite-containing mixtures, which are used as an impermeable engineering barrier in waste disposal facilities and energy geo-structures, are exposed to thermal changes over time. It is very important for the performance of energy geo-structures and environment and human health that the soils are maintained for a long time without deterioration of their engineering properties under these thermal changes. In this study, the effects of temperature (20 and 80 °C) and temperature cycles on the shear strength behavior of compacted sand-bentonite and zeolite-bentonite mixtures were investigated. In addition, tincal, which is a boron mineral and has high temperature resistance, was added to these mixtures and its effect on the shear behavior of these mixtures at high temperatures was investigated. The shear strength of the mixtures generally increased between 5% and 15% with increasing temperature. In addition, the addition of tincal was found to be beneficial in terms of shear strength, especially for sand-bentonite mixtures.

**Keywords:** Bentonite, Tincal, Shear box, Shear strength, High temperature

#### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction

Engineering barriers are used to prevent leachate from landfills or radionuclides from nuclear waste repositories from entering groundwater. Bentonite, a montmorillonitic clay, is generally preferred as a barrier material due to its low permeability, good water retention capacity, and high swelling potential [1, 2, 3, 4]. In the Swiss concept for the disposal of low- and medium-level nuclear waste, sand-bentonite mixtures with 20-30% bentonite content were selected as possible backfill materials due to their low water permeability, good water retention capacity, and swelling potential [5].

Zeolites are aluminosilicate minerals formed by alteration of volcanic material under various geochemical conditions [7]. Zeolite-bentonite mixtures are recommended as an alternative to

sand-bentonite mixtures because they are not affected by water content changes and have low hydraulic conductivity [9].

In order to maintain the long-term stability of energy geo-structures, it is very important to investigate the effect of temperature changes on the mechanical and hydraulic behavior of barrier materials to prevent undesirable conditions such as settlement, shear failure, and increased hydraulic conductivity.

According to the results of triaxial compression tests performed at high temperature for normally consolidated kaolin clay, it was reported that the shear strength at the critical state was independent of temperature, but the peak shear strength increased with increasing temperature [13]. Lahoori et al. [16] reported that no significant change was observed in the shear strength parameters of compacted sandy clay when the temperature was increased from 20 °C to 50 °C and temperature

cycles were applied. Zheng et al. [17] investigated the effect of high temperatures (100 °C and 200 °C) on bentonite backfill and clay bedrock in a radioactive waste disposal repository. In general, it was reported that the illitization of bentonite increased with increasing temperature. However, De Bruyn and Thimus [19] reported that the mechanical strength of Boom clay decreased when the temperature increased up to 80 °C. In another study, it was observed that the strength of the buffer material (sand-bentonite) decreased when the temperature was increased to 100 °C [20].

The soil surrounding the energy geo-structures undergo thermal changes due to high temperatures, which can cause damage to these structures, the environment, and human health. Therefore, it is necessary to maintain the properties of the barrier material at high temperatures. Additives with low thermal expansion such as boron may be used to increase the thermal resistance of the buffer material.

In this study, the shear strength behavior of compacted sand-bentonite (SB) and zeolite-bentonite (ZB) mixtures in the presence of tincal additive was investigated under high temperature and thermal cycles.

### Materials and Methods

In this study, sand, sodium (Na)-bentonite, zeolite and tincal were used. Sand-bentonite (SB) and zeolite-bentonite (ZB) mixtures were mixed at a ratio of 80:20 and 10% tincal was added to these mixtures. Sand and bentonite were classified as well-graded sand (SW) and high-plasticity clay (CH), respectively [23]. Some physico-chemical properties of the materials are given in Table 1.

Bentonite and zeolite were then sieved through No.200 sieve (0.075 mm) and sand through No.6 sieve (3.35 mm). The tincal particles were less than 0.425 mm in diameter. The mixtures were named using the initials of the materials. For example, SBT refers to tincal-added sand-bentonite mixture. The shear box tests were performed in accordance with ASTM D3080 [25]. The mixtures were compacted in three layers according to the compaction parameters (Table 2) and placed in a shear mold (6 cm x 6 cm). The prepared samples were submerged in water for 24 h to get saturation. Three different normal stresses (49, 98, 196 kPa) were applied in the tests and the samples were consolidated under these stresses.

The shear box tests were performed under three different conditions: room temperature, 80 °C and thermal cycle (20-80-20 °C). The conventional shear box device was modified to perform the tests at high temperatures (Figure 1). The modified experimental system consists of a conventional shear box, heat rod, thermostat, and K-type thermocouple. The heat rod was placed inside the cell and indirectly heated the sample by heating the water. The thermostat kept the temperature constant at 80 °C and continuous temperature recording was provided by K-type thermocouples connected to a digital thermometer.

For the tests performed under thermal cycling, the samples were consolidated at a normal stress of 196 kPa for 24 h. At this stage, the specimen was exposed to 80 °C for 8 h, followed by 16 h at 20 °C. Thus, the sample was subjected to one thermal cycle, then the test was conducted at room temperature in the saturated state.

### Results and Discussion

The variation of shear stress versus horizontal displacement of SB and ZB mixtures at room temperature, 80 °C and after exposure to one thermal cycle for  $\sigma_n = 196$  kPa was investigated. The shear strength of SB mixtures increased in the presence of tincal at both temperatures (Figure 2a). There was a slight

increase in the peak and residual shear strength for both SB and SBT when the temperature was increased to 80 °C. However, the temperature increase did not have a significant effect on the stress-displacement range in which the soil showed elastic deformation.

The shear stress values of ZB mixtures decreased at both temperatures in the presence of tincal, in contrast to SB mixtures (Figure 2b). In addition, the residual and peak shear strengths of ZB and ZBT increased with increasing temperature. The positive effect of high temperature on shear stress was more pronounced in ZB mixtures. As the temperature increases, the smectite mineral transforms into a more stable silicate phase by cementation and illitization [14]. As a result, the water retention capacity of the clay decreases. When the water retention capacity of clay (smectite) decreases, its strength is expected to increase. Wang et al. [28] reported that under the same consolidation stress, the viscosity of adsorbed water decreases as the temperature increases and the porosity decreases accordingly. Thermal contraction of the soil at high temperatures leads to an increase in shear strength [29]. In addition, it was reported that the clay showed hardening behavior as temperature increased [30]. When the temperature was increased, the shear strength of ZB mixtures showed a higher increase compared to SB mixtures. This is because the shrinkage behavior of zeolite is more pronounced with increasing temperature. A large part of the zeolite skeleton shows a shrinkage of its cellular dimensions in the presence of high temperatures [31].

The shear strength of SB increased with the tincal addition under both temperatures. Boron minerals are strongly held by the aluminum or silicon tetrahedron present in the bentonite structure [32]. As a result of boron adsorption, the shear strength of the SB mixtures increased. Another reason for this may be the material replacement. Because the sand-bentonite ratio was reduced as much as the tincal added to the mixture. Bentonite is a material with low strength and high swelling potential. By reducing the bentonite ratio in the mixture and adding tincal with low swelling potential instead, the strength may increase.

In general, the internal friction angles of ZB mixtures were higher than SB mixtures at both temperatures. Temperature increase and tincal addition generally decreased the  $c'$  values of the mixtures (Table 3). For example, the  $c'$  value of SBT, which was 32.9 kPa at room temperature, decreased to 10.1 kPa when the temperature was increased. Similarly, it was reported in previous studies that the cohesion decreased linearly with increasing temperatures (20-60 °C) [33]. The shear box tests of SB and ZB mixtures under 196 kPa vertical stress were performed after a thermal cycle (20-80-20 °C). The maximum shear stress of SB after one thermal cycling was determined as 192.8 kPa (Table 4). The maximum shear stress of the ZB after one thermal cycling was 130.1 kPa. The shear strength values of the samples subjected to the thermal cycle were significantly higher compared to the shear strength of the specimens tested at room temperature and 80 °C. The strength of the additive-free SB increased up to three times. This is due to both the exposure of the specimens to higher temperatures and the reduction of the shear rate by up to 100 times. With the reduced shear rate, the pore water pressures were allowed to be fully drained. It is expected that the strength of the drained specimen would increase. It is thought that the amount of plastic shrinkage in the soil increased with the increase of the exposure time to temperature up to 10 times.

## Conclusion

According to the shear box test results, the residual and peak shear strengths for all mixtures increased with increasing temperature. Tincal additive had an increasing effect on the shear strength of SB at both temperatures (20 and 80 °C), but decreased the shear strength of ZB mixtures.

As the temperature of all mixtures was increased to 80 °C, the internal friction angles increased and cohesion values decreased. The addition of tincal under thermal cycle had a decreasing effect on the shear strength. However, tincal addition was found to be beneficial in terms of shear strength at 80 °C, especially for SB mixtures.

## 1. Giriş

Atık depolama alanlarındaki sızıntı sularının veya nükleer atık depolarındaki radyonüklitlerin yer altı suyuna karışmasını önlemek için mühendislik bariyerleri kullanılır. Montmorillonitik bir kil olan bentonit, geçirgenliğinin düşük ve şişme potansiyelinin yüksek olması nedeniyle genellikle bariyer malzemesi olarak tercih edilmektedir [1, 2, 3, 4]. Sıkıştırılmış bentonitin su içeriğinin azalması durumunda çatlaklar oluşabilmekte ve bu durum bariyerin uzun vadeli performansını olumsuz etkilemektedir. Düşük ve orta seviyeli nükleer atıkların bertaraf için, düşük su geçirgenlikleri, iyi su tutma kapasiteleri ve şişme potansiyelleri nedeniyle %20-30 bentonit içeriğine sahip kum-bentonit karışımları olası dolgu malzemeleri olarak seçilmiştir [5]. Bu nedenle farklı oranlarda kum ve bentonit içeren kum-bentonit karışımları bariyer malzemesi olarak tercih edilmektedir [6].

Zeolitler, tektosilikatlar sınıfına ait, çeşitli jeokimyasal koşullar altında volkanik malzemenin değişmesiyle oluşan alüminosilikat minerallerdir [7]. Zeolitik tüfler genellikle yumuşak, ufalanabilir ve hafiftir ve genellikle %50-95 oranında reaksiyona girmemiş volkanik cam ve kuvars, K-feldspat, kalsit ve jips gibi diğer mineral fazlar ile bir arada var olabilen bir veya daha fazla zeolit içerir [8]. Zeolit yapısı  $\text{SiO}_4$  ve  $\text{AlO}_4$  tetrahedronlarından oluşan çerçeveden oluşur. Zeolit yapısında bulunan  $\text{Al}^{3+}$ 'nin  $\text{Si}^{4+}$  ile yer değiştirmesi, zeolitlerin yüzeyinin genellikle negatif yüklü olmasına neden olur. Zeolit, düşük hacimsel büzülme potansiyeli nedeniyle atık depolama alanlarında bir bariyer malzemesi olarak kabul edilir. Zeolit-bentonit karışımları, su içeriği değişimlerinden etkilenmediği ve hidrolik iletkenliği düşük olduğu için kum-bentonit karışımlarına alternatif olarak önerilmektedir [9]. Zeolit hidrolitik iletkenlik değerinin atık depolama alanlarında örtü uygulamaları için yeterli olduğu bildirilmiştir [10].

Nükleer atık depolama alanlarında kimyasal ve radyoaktif bozunma sebebiyle meydana gelen termal değişimler, anakaya üzerinde termal gerilmelere neden olabilir. Bu nedenle anakaya yüzeylerindeki sıcaklık her zaman 100 °C'nin altında olmalıdır. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan zeminler ve geçirimsiz mühendislik bariyeri uygulamalarında kullanılan tampon malzemeler (katı atık ve nükleer atık depolama alanları, enerji kazıkları, ısı depolama tesisleri vb.) mühendislik özelliklerini uzun süre boyunca değişmeden muhafaza etmelidir. Zeminin mühendislik özelliklerinin yüksek sıcaklıklarda değişiklik gösterdiği önceki çalışmalardan bilinmektedir [11, 12]. Enerji yapılarının uzun dönemli stabilitesini koruyabilmek için oturma, kayma göçmesi, hidrolik iletkenliğin artması gibi istenmeyen durumların önlenmesi için sıcaklık değişimlerinin bariyer malzemelerinin mekanik ve hidrolik davranışlarına etkisinin araştırılması oldukça önemlidir.

Normal konsolide kaolin kili için yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre, kritik durumdaki kayma dayanımının sıcaklıktan bağımsız olduğu ancak artan sıcaklıkla pik kayma dayanımının arttığı bildirilmiştir [13]. Normal konsolide yumuşak Bangkok kili için

de benzer sonuçlar elde edilmiştir [14]. Normal konsolide yumuşak Bangkok kili üzerinde 90 °C sıcaklığa kadar gerçekleştirilen üç eksenli deneyler sonucunda, daha yüksek sıcaklıklarda daha yüksek pik deviyör gerilmeler rapor edilmiştir. Normal konsolide kaolinin yüksek sıcaklıkta (22-60 °C) hem kritik hem de pik kayma dayanımının artan sıcaklıkla birlikte arttığı bulgulanmıştır [15]. Lahoori vd. [16], sıcaklık değişimleri altında sıkıştırılmış kumlu kilin kayma dayanımı parametrelerinde sıcaklık 20 °C'den 50 °C'ye artırıldığında ve sıcaklık döngüleri uygulandığında önemli bir değişiklik gözlenmediğini bildirmiştir. Zheng vd. [17], yüksek sıcaklıkların (100 °C ve 200 °C) bir radyoaktif atık bertaraf deposundaki bentonit dolgu ve kil anakaya üzerindeki etkisini araştırmıştır. Genel olarak sıcaklık arttıkça bentonitin illitleşmesinin arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte; yüksek sıcaklığın kalkerli ve kuvars kumunun kayma mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmak için drenajlı kesme deneyleri yapılmıştır [18]. Sıcaklık artışı, kumun maksimum içsel sürtünme açısını azaltıcı yönde etki göstermiştir. De Bruyn ve Thimus [19], sıcaklık 80 °C'ye kadar arttığında Boom kilinin mekanik dayanımının azaldığını bildirmişlerdir. Başka bir çalışmada, sıcaklık 100 °C'ye çıkarıldığında tampon malzemenin (kum-bentonit) mukavemetinin azaldığı görülmüştür [20]. Killi zemin üzerinde yapılan bir çalışmada, sıcaklık 50 °C'ye artırıldığında killi zeminin yapısal dayanımı azalmış ve ısıtma sonrası zeminde termal yumuşama davranışı gözlenmiştir [21]. Ayrıca ısıtma-soğutma döngüsü (20-30-40-50-40-30-20°C) sonrasında zeminin mukavemetinde iyileşme rapor edilmiştir.

Enerji yapılarını çevreleyen zeminlerde yüksek sıcaklık etkisiyle yapıların performansını düşürecek değişimler oluşabilir ve bu durum enerji yapısına, çevreye ve insan sağlığına zarar verebilir. Bu nedenle bariyer malzemesinin mühendislik özelliklerinin yüksek sıcaklıklarda korunması gerekmektedir. Tampon malzemenin termal dayanıklılığını arttırmak için bor gibi termal genişmesi düşük katkı malzemeleri kullanılabilir. Bor, farklı oranlarda bor oksit içeren doğal bir bileşiktir. Borun erime noktası  $2190 \pm 20$  °C, kaynama noktası ise 2250 °C'dir. Endüstride en çok kullanılan bor minerallerinden bazıları tincal, kolemanit ve üleksittir. Bor mineralleri, kil yapısındaki alüminyum veya silikon tetrahedron tarafından güçlü bir şekilde tutulur [22].

Bu çalışmada, sıkıştırılmış kum-bentonit (SB) ve zeolit bentonit (ZB) karışımlarının tincal katkısı varlığında kayma dayanımı davranışları yüksek sıcaklık ve termal döngüler altında incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Malzeme karakterizasyonu

Bu çalışma kapsamında zemin olarak kum, sodyum (Na)-bentonit, zeolit ve katkı malzemesi olarak da bir bor minerali olan tincal kullanılmıştır. Kum-bentonit (SB) ve zeolit-bentonit (ZB) karışımları 80:20 oranında karıştırılmış ve bu karışımlara %10 tincal katkısı ilave edilmiştir. Kum, zeolit ve bentonit yerel şirketlerden tedarik edilmiştir. Tincal, Türkiye Eti Madencilik Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Kum ve bentonit sırasıyla iyi derecelenmiş kum (SW) ve yüksek plastisiteli kil (CH) olarak

sınıflandırılmıştır [23]. Kullanılan malzemelerin bazı fiziko-kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

**Table 1.** Malzemelerin fiziko-kimyasal özellikleri

	Kum	Zeolit	Bentonit	Tinkal
Özgül ağırlık	2,63	2,30	2,70	1,67
Likit limit(%)	-	-	476,0	61,0
Plastik limit(%)	-	NP*	70,1	43,0
-No.200(%)	0,4	100,0	100,0	91,3
pH	-	8,50	9,50	9,12

\*NP: Plastiklik özelliği göstermeyen

Kum, zeolit ve bentonit, deneylerde kullanılmadan önce etüvde (105 °C) 24 saat boyunca kurutulmuştur. Daha sonra bentonit ve zeolit No.200 elekten (0,075 mm) ve kum No.6 elekten (3,35 mm) elenerek kullanılmıştır. Tinkal mineralinin, yüksek sıcaklıkta yapısı değiştiği için kurutma işlemi uygulanmamıştır. Bu yüzden deneylerden önce tinkalin doğal su içeriği belirlenmiş ve karışımlar hazırlanırken yapılan hesaplamalarda dikkate alınmıştır. Çalışmada kullanılan en büyük tinkal çapı 0,425 mm olarak belirlenmiştir. Numuneler, Standart Proctor deneyinden [24] elde edilen kompaksiyon parametrelerine göre sıkıştırılmıştır (Tablo 2). Karışımlar adlandırılırken malzemelerin İngilizce isimlerinin baş harfleri kullanılmıştır. Buna göre bentonit B, kum S, zeolit Z, tinkal T olarak kısaltılmıştır. Örneğin SBT tinkal katkılı kum-bentonit karışımını ifade etmektedir.

**Table 2.** Karışımların kompaksiyon parametreleri

Karışım	$\gamma_{d,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_{opt}$ (%)
SB	15.89	16.8
SBT	15.79	18.5
ZB	10.20	42.0
ZBT	10.79	43.5

## 2.2. Kesme kutusu deneyi

Kesme kutusu deneyleri ASTM D3080 [25] standartına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Karışımlar kompaksiyon parametrelerine uygun olarak üç tabaka halinde sıkıştırılmış ve 2 cm yüksekliğinde kare (6 cm x 6 cm) bir kesme kalıbına yerleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler, doymun hale gelmesi için 24 saat boyunca suya batık durumda bekletilmiştir. Kesme kutusu deneylerinde üç farklı normal gerilme (49, 98, 196 kPa) uygulanmış ve numuneler bu gerilmeler altında konsolide edilmiştir.

Deneylerde kesme hızı 0,5 mm/dk olarak uygulanmıştır. Kesme kutusu deneyleri oda sıcaklığı, 80 °C ve termal döngü (20-80-20 °C) altında olmak üzere üç ayrı termal koşulda gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yüksek sıcaklıkta yapılabilmesi için geleneksel kesme kutusu cihazı modifiye edilmiştir. Modifiye edilmiş deneysel sistem, geleneksel bir kesme kutusu, ısı çubuğu, termostat ve K tipi termokupludan oluşur. Isı çubuğu hücrenin içine yerleştirilerek hücre suyunu ısıtarak dolaylı olarak numuneyi ısıtmıştır. Termostat, sıcaklığı 80 °C'de sabit tutmuştur ve dijital termometreye bağlı K tipi termokupllar ile sürekli

sıcaklık kaydı sağlanmıştır. Yüksek sıcaklık için kesme kutusu deney düzeneği Şekil 1'de gösterilmektedir.

Termal döngü altında gerçekleştirilen kesme kutusu deneyleri için numuneler 24 saat boyunca 196 kPa normal gerilme altında su altında konsolide edilmiştir. Bu aşamada numune 8 saat boyunca 80 °C sıcaklığa maruz bırakılmış, ardından 16 saat boyunca 20 °C'de bekletilmiştir. Böylece numune bir termal döngüye maruz bırakılmış olup, ardından deney doymun durumunda, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Termal döngüye maruz kalan numunelerden kum içeren karışımlar 0,004 mm/dk, zeolit içeren karışımlar ise 0,02 mm/dk kesme hızı ile kesilmiştir [26].

## 3. Bulgular ve Tartışma

SB, SBT, ZB ve ZBT karışımlarının oda sıcaklığı, 80 °C ve termal döngü (20-80-20 °C) altında yapılan kesme kutusu deneylerinin sonuçları bu bölümde verilmiştir. SB ve ZB karışımlarının oda sıcaklığında ve 80 °C'de  $\sigma_n=196$  kPa için yatay yer değiştirmesine (deplasmanına) karşı kayma gerilmesinin değişimi Şekil 2'de gösterilmektedir.

Her iki sıcaklıkta da tinkal katkısı varlığında SB karışımlarının kayma dayanımı artmıştır (Şekil 2a). Tinkal katkısı varlığında aynı kayma gerilmesine karşılık gelen kayma yer değiştirmesi azalmıştır. Sıcaklık, oda sıcaklığından 80 °C'ye yükseltildiğinde hem SB hem de SBT için pik ve rezidüel kayma dayanımında hafif bir artış olmuştur. SB karışımının pik kayma dayanımı oda sıcaklığında 63,1 kPa iken 80 °C'de 65,6 kPa değerine yükselmiştir. SBT karışımının kayma gerilmesi ise sıcaklık artışıyla birlikte yaklaşık %8 artarak 102,6 kPa değerine ulaşmıştır. Bununla birlikte, sıcaklık artışının, zeminin elastik deformasyon gösterdiği gerilme-yer değiştirme aralığı üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır.

ZB karışımlarının kayma gerilmesi değerleri, SB karışımlarının aksine, tinkal varlığında her iki sıcaklıkta da azalmıştır. Ek olarak, ZB ve ZBT karışımlarının rezidüel ve pik kayma dayanımları sıcaklığın artmasıyla birlikte artmıştır. Örneğin ZB karışımının maksimum kayma gerilmesi artan sıcaklıkla birlikte 103,7 kPa değerinden 118,5 kPa değerine %14 oranında artış göstermiştir. Yüksek sıcaklığın kayma gerilmesi üzerindeki olumlu etkisi ZB karışımlarında daha belirgin olmuştur. Ayrıca ZB karışımlarında göçme daha küçük kayma yer değiştirmesi değerlerinde meydana gelmiştir (Şekil 2b).

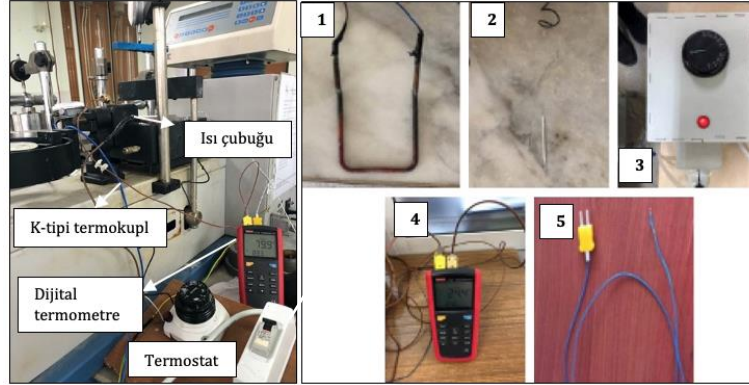
Sıcaklık arttırıldığında tüm karışımların kayma dayanımları artmıştır. Sıcaklık arttıkça smektit minerali çimentolaşma ve illitizasyon ile daha kararlı olan silikat fazına dönüşür [14]. Bunun sonucunda kilin su tutma kapasitesi azalır. Kilin (simektit) su tutma kapasitesi azaldığında dayanımının artması beklenir. Wang vd. [28] yaptıkları çalışmada aynı konsolidasyon gerilmesi altında sıcaklık arttıkça adsorbe edilen suyun viskozitesinin azaldığını ve buna bağlı olarak da porozitenin azaldığını rapor etmişlerdir. Yüksek sıcaklıkta zeminde meydana gelen termal büzülme sonucunda kayma dayanımında artış olmaktadır [29]. Ayrıca artan sıcaklıkta kilin kayma gerilmesi incelendiğinde kilin pekleşme davranışı gösterdiği bildirilmiştir [30].

Sıcaklık arttırıldığı zaman ZB karışımlarının kayma dayanımları, SB karışımlarına kıyasla daha yüksek artış göstermiştir. Bunun nedeni, zeolit artan sıcaklıkla büzülme davranışının daha belirgin olmasıdır. Zeolit iskeletinin büyük bir kısmı, yüksek sıcaklık varlığında hücresel boyutlarında bir büzülme gösterir [31].

SB karışımının kayma dayanımı tinkal ilavesiyle hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıkta artmıştır. Bor mineralleri, bentonit yapısında bulunan alüminyum veya silikon tetrahedron

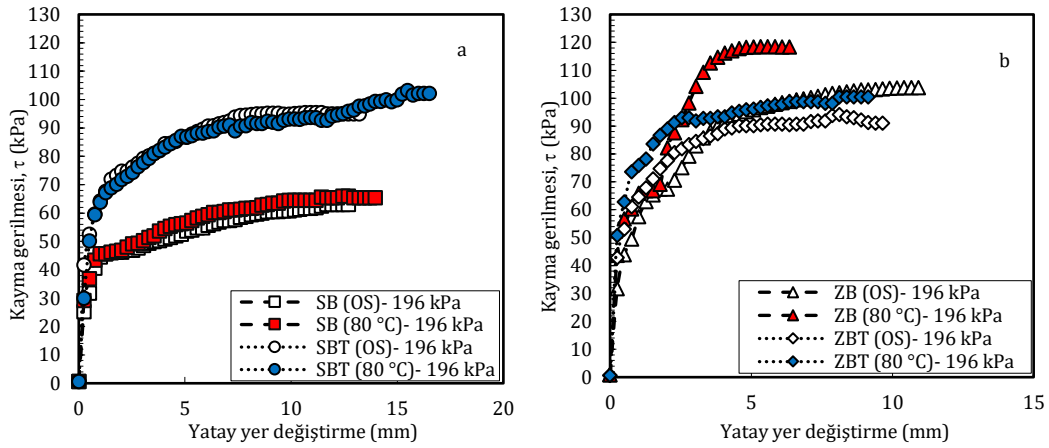
tarafından güçlü bir şekilde tutulur [32]. Bor adsorpsiyonunun bir sonucu olarak, kum-bentonit karışımının kasma dayanımı dolaylı olarak artmıştır. Bunun bir başka nedeni de malzeme

değişimi olabilir. Çünkü karışıma eklenen tinkal minerali kadar kum-bentonit oranı azaltılmıştır.



**Şekil 1.** Modifiye edilmiş deney düzeneği (1: ısı çubuğu, 2: termostat, 3: termostat kutusu, 4: dijital termometre, 5: K-tipi termokupl)

**Figure 1.** Modified experimental set-up (1: heat rod, 2: thermostat, 3: thermostat box, 4: digital thermometer, 5: K-type thermocouple)



**Şekil 2.** Yüksek sıcaklığın kayma gerilmesi-yer değiştirme üzerindeki etkisi a) SB, b) ZB karışımları

**Figure 2.** Effect of high temperature on the shear stress-horizontal displacement a) SB, b) ZB mixtures

Bentonit, düşük dayanıma ve yüksek şişme potansiyeline sahip bir malzemedir. Karışımdaki bentonit oranının düşürülmesi ve onun yerine şişme potansiyeli düşük olan tinkal ilavesi ile dayanım artabilir. SB ve ZB karışımlarının oda sıcaklığı ve 80 °C'de kayma gerilmesi-normal gerilme grafikleri Şekil 3'te gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 3'ten elde edilen kayma dayanımı parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Karışımların OS ve 80 °C'deki kayma dayanımı parametreleri

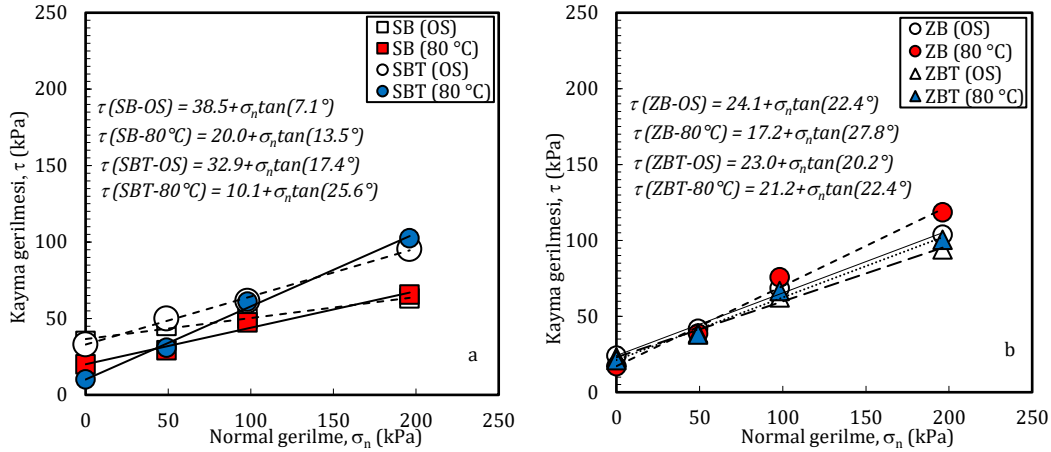
**Table 3.** Shear strength parameters of the mixtures at RT and 80 °C

Karışım	Oda sıcaklığı		80 °C	
	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)
SB	7,1	38,5	13,5	20,0
SBT	17,4	32,9	25,6	10,1
ZB	22,4	24,1	27,8	17,2
ZBT	20,2	23,0	22,4	21,2

Genel olarak ZB karışımlarının içsel sürtünme açıları her iki sıcaklıkta da SB karışımlarından daha yüksek elde edilmiştir. SB karışımına oda sıcaklığında ve 80 °C'de tinkal ilave edildiğinde içsel sürtünme açısı ( $\phi'$ ) artarken kohezyon ( $c'$ ) değeri azalmıştır. Tinkal katkısı ile içsel sürtünme açısı oda sıcaklığında ve 80 °C'de yaklaşık iki kat artarak sırasıyla 17,4° ve 25,6° değerlerine yükselmiştir.

ZB karışımlarının  $\phi'$  değerleri tinkal katkısı varlığında her iki sıcaklıkta da bir miktar azalmıştır. Ancak her bir karışım için  $\phi'$  değerleri, sıcaklık 80 °C'ye artırıldığında %25'e kadar artış göstermiştir. Karışımlar arasında her iki termal koşul için de en yüksek  $\phi'$  değeri (27,8°) 80 °C'de ZB karışımı için elde edilmiştir. Sıcaklık artışı ve tinkal ilavesi genel olarak karışımların  $c'$  değerlerini azaltıcı etki yapmıştır. Örneğin SBT karışımının oda sıcaklığında 32,9 kPa olan  $c'$  değeri, sıcaklık artırıldığında 10,1 kPa değerine azalmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda benzer olarak artan sıcaklıklarla (20-60 °C) kohezyonun lineer olarak azaldığı bildirilmiştir [33]. Ayrıca hem yüksek sıcaklık hem de tinkal katkısının SB'nin kayma dayanımı parametreleri üzerindeki etkisi ZB'ye kıyasla çok daha belirgin olmuştur.

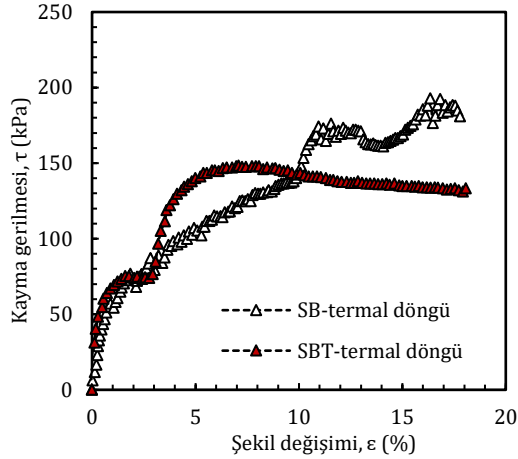




Şekil 3. Oda sıcaklığı ve 80 °C'de kayma gerilmesi-normal gerilme grafikleri a) SB, b) ZB karışımları

Figure 3. Shear stress against effective normal stress at RT and 80 °C a) SB, b) ZB mixtures

SB ve ZB karışımlarının 196 kPa düşey gerilme altında, bir termal döngü (20-80-20 °C) uygulandıktan sonra kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Termal döngü aşamasında zemin 8 saat 80 °C'ye maruz bırakılmış, daha sonra sıcaklık oda sıcaklığına azaltılarak 16 saat bekletilmiştir. SB karışımlarının termal döngü altında kayma gerilmesi-şekil değişimi grafiği Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Tincal katkılı kum-bentonit karışımlarının termal döngü altında kayma gerilmesi-şekil değişimi grafiği

Figure 4. Shear stress-strain of tincal added sand-bentonite mixtures under thermal cycle

SB karışımının maksimum kayma gerilmesi 192,8 kPa olarak belirlenmiştir. SB karışımının maksimum ve rezidüel kayma dayanımı tincal katkısıyla %30 oranında azalmıştır. Bununla birlikte, tincal katkılı karışım pik kayma dayanımına daha düşük şekil değişiminde ulaşmıştır. ZB karışımının bir termal döngüye maruz bırakıldıktan sonra maksimum kayma gerilmesi 130,1 kPa olarak belirlenmiştir.

Ayrıca tüm karışımların oda sıcaklığı, 80 °C ve termal döngü altında maksimum kayma gerilmesi değerleri Tablo 4'te sunulmaktadır. Termal döngüye maruz kalmış numunelerin kayma dayanımları, oda sıcaklığı ve 80 °C'de deneyleri gerçekleştirilmiş numunelerin kayma dayanımlarına kıyasla önemli derecede yüksek elde edilmiştir.

Katkısız SB karışımında dayanım üç kata kadar artmıştır. Bunun sebebi hem numunelerin daha fazla yüksek sıcaklığa maruz bırakılması hem de kesme hızının 100 kata kadar azalmasıdır.

Azalan kesme hızıyla birlikte zemindeki boşluk suyu basınçlarının tamamen sönmülmesine izin verilmiştir. Drene olan numunenin dayanımının artması beklenen bir durumdur. Sıcaklığa maruz kalma süresinin de 10 kata kadar artmasıyla zeminin plastik büzülme miktarının arttığı düşünülmektedir.

Tablo 4. Tüm karışımların oda sıcaklığı, 80 °C ve termal döngü altında maksimum kayma gerilmesi

Table 4. Maximum shear stress of all mixtures at room temperature, 80 °C and thermal cycle

Karışım	Kayma Dayanımı, τ (kPa)		
	Oda sıcaklığı	80°C	Termal döngü (20-80-20°C)
	$\sigma_v = 196,1 \text{ kPa}$		
SB	63,1	65,6	192,8
SBT	95,4	102,5	148,3
ZB	103,8	118,5	130,1
ZBT	94,1	100,4	160,2

#### 4. Sonuçlar

Kum-bentonit (SB) ve zeolit-bentonit (ZB) karışımlarının tincal katkısı varlığında kesme kutusu deneyleri oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık (80 °C) altında gerçekleştirilerek, kesme dayanımı parametreleri elde edilmiştir. Ayrıca termal döngüler (20-80-20 °C) altında karışımların 196 kPa düşey gerilme altında kayma gerilmeleri belirlenmiştir. Deney sonuçlarına dayanarak katkı malzemesi ve sıcaklık değişimlerinin kayma dayanımı davranışı üzerine etkileri incelenmiştir.

Kesme kutusu deney sonuçlarına göre, artan sıcaklıkla birlikte tüm karışımlar için rezidüel ve pik kayma dayanımları artmıştır. Tincal katkı maddesinin her iki sıcaklıkta da (20 ve 80 °C) SB karışımının kayma dayanımı üzerinde artırıcı etkisi vardır, ancak; ZB karışımlarının kayma dayanımını azaltmıştır. Kum-bentonit karışımlarına tincal ilavesi oda sıcaklığındaki ve 80 °C'deki içsel sürtünme açılarını arttırırken, kohezyon değerlerini azaltıcı olarak etkide bulunmuştur.

Tüm karışımların sıcaklığın 80 °C'ye arttırılmasıyla birlikte içsel sürtünme açıları artmış, kohezyon değerleri azalmıştır. Termal döngü altında kayma dayanımları, oda sıcaklığı ve 80 °C'de elde edilen değerlere göre oldukça yüksek bulunmuştur. Termal

döngüler altında tinkal katkısı ise kayma dayanımını azaltıcı yönde etki etmiştir. Ancak tinkal ilavesi özellikle kum-bentonit karışımları için 80 °C'de kayma dayanımı açısından faydalı bulunmuştur.

### **Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı**

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

### **Teşekkür**

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje no: 217M553). Yazarlar bu destek ve SGA'nın 100/2000 Yükseköğretim Kurulu (YÖK) Doktora Bursu için minnettardır.

### **Yazar katkılarının beyanı**

Şükran Gizem Alpaydin: Deneysel araştırma, Metodoloji, Yazma – orijinal taslak. Yeliz Yükselen-Aksoy: Metodoloji, Yazma – inceleme ve düzenleme, Finansman temini, Proje yönetimi.

### **Kaynaklar**

- [1] Cho, W.J., Lee, J.O., Chun, K.S., Hahn, D.S. 1999. Basic Physicochemical Properties of Domestic Bentonite for Use as a Buffer Material in a High-Level Radioactive Waste Repository, *Journal of the Korean Nuclear Society*, Cilt. 31, s. 39-50.
- [2] Karnland, O., Birgersson, M. 2006. Montmorillonite Stability with Respect to KBS-3 Conditions. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, Sweden. Technical Report, No. SKB-TR-06-11.
- [3] Villar, M.V., Lloret, A. 2008. Influence of Dry Density and Water Content on the Swelling of a Compacted Bentonite, *Applied Clay Science*, Cilt. 39(1-2), s. 38-49. DOI: 10.1016/j.clay.2007.04.007
- [4] Komine, H., Watanabe, Y. 2010. The Past, Present and Future of the Geo-Environment in Japan, *Soils and Foundations*, Cilt. 50(6), s. 977-982.
- [5] Nagra. 2008. Effects of Post-Disposal Gas Generation in a Repository for Low- and Intermediate-Level Waste Sited in the Opalinus Clay of Northern Switzerland, Technical Report 08-07. Wetingen, Switzerland: Nagra. Cilt. 41(10), 175s.
- [6] Mollins, L.H., Stewart, D., Cousens, T.W. 1996. Predicting the Properties of Bentonite-Sand Mixtures, *Clay Minerals*, Cilt. 31(02), s. 243-252. DOI: 10.1180/claymin.1996.031.2.10
- [7] Karakaya, M.Ç., Karakaya, N., Yavuz, F. 2015. Geology and Conditions of Formation of the Zeolite-Bearing Deposits Southeast of Ankara (Central Turkey), *Clays and Clay Minerals*, Cilt. 63(2), s. 85-109. DOI: 10.1346/CCMN.2015.0630202
- [8] Mumpton, F.A. 1999. La Roca Magica: Uses of Natural Zeolites in Agriculture and Industry, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Cilt. 96(7), s. 3463-3470. DOI: 10.1073/pnas.96.7.346
- [9] Kaya, A., Durukan, S., Oren, A.H., Yükselen, Y. 2006. Determining the Engineering Properties of Bentonite-Zeolite Mixtures, *Teknik Dergi*, Cilt. 17(3), s. 3879-3892.
- [10] Yükselen-Aksoy, Y. 2010. Characterization of Two Natural Zeolites for Geotechnical and Geoenvironmental Applications, *Applied Clay Science*, Cilt. 50, s. 130-136. DOI: 10.1016/j.clay.2010.07.015
- [11] Burghignoli, A., Desideri, A., Miliziano, S. 2000. A Laboratory Study on the Thermomechanical Behaviour of Clayey Soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Cilt. 37, s. 764-780. DOI: 10.1139/cgj-37-4-764
- [12] Sultan, N., Delage, P., Cui, Y.J. 2002. Temperature Effects on the Volume Change Behaviour of Boom Clay, *Engineering Geology*, Cilt. 64, s. 135-145. DOI: 10.1016/S0013-7952(01)00143-0
- [13] Cekerevac, C., Laloui, L. 2004. Experimental Study of Thermal Effects on the Mechanical Behaviour of a Clay, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Cilt. 28, s. 209-28. DOI: 10.1002/nag.332
- [14] Abuel-Naga, H.M., Bergado, D.T., Ramana, G.V., Grino, L., Rujivipat, P., Thet, Y. 2006. Experimental Evaluation of Engineering Behavior of Soft Bangkok Clay under Elevated Temperature, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Cilt. 132(7), s. 902-910. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:7(902)
- [15] Maghsoodi, S., Cuisinier, O., Masrouri, F. 2018. Thermal Effects on Mechanical Behaviour of Soil-Structure Interface, *Canadian Geotechnical Journal*, Cilt. 57(1), s. 32-47. DOI: 10.1139/cgj-2018-0583
- [16] Lahoori, M., Rosin-Paumier, S., Masrouri, F. 2021. Effect of Monotonic and Cyclic Temperature Variations on the Mechanical Behavior of a Compacted Soil, *Engineering Geology*, Cilt. 290 s. 106195. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106195
- [17] Zheng, L., Rutqvist, J., Birkholzer, J.T., Liu, H.H. 2015. On the Impact of Temperatures up to 200°C in Clay Repositories with Bentonite Engineer Barrier Systems: A Study with Coupled Thermal, Hydrological, Chemical, and Mechanical Modeling, *Engineering Geology*, Cilt. 197, s. 278-295. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.08.026
- [18] He, S.H., Shan, H.F., Xia, T.D., Liu Z.J., Ding, Z., Xia, F. 2021. The Effect of Temperature on the Drained Shear Behavior of Calcareous Sand, *Acta Geotechnica*, Cilt. 16, s. 613-33. DOI: 10.1007/s11440-020-01030-7
- [19] De Bruyn, D., Thimus, J.F. 1996. The Influence of Temperature on Mechanical Characteristics of Boom Clay: The Results of an Initial Laboratory Programme, *Engineering Geology*, Cilt. 41(1-4), s. 117-126. DOI: 10.1016/0013-7952(95)00029-1
- [20] Lingnau, B.E., Yarechewski, D., Tanaka, N., Gray, M.N. 1996. Effects of Temperature on Strength and Compressibility of Sand-Bentonite Buffer, *Engineering Geology*, Cilt. 41(1-4), s. 103-115. DOI: 10.1016/0013-7952(95)00028-3
- [21] Gu, K., Tang, C., Shi, B. 2014. A Study of the Effect of Temperature on the Structural Strength of a Clayey Soil Using a Micropenetrator, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Cilt. 73(3), s. 747-758. DOI: 10.1007/s10064-013-0543-y
- [22] Privett, K. 1987. *J.E. Gillott Clay in Engineering Geology*, 2nd Edition. (Developments in Geotechnical Engineering, 41.) Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 474s.
- [23] ASTM D2487-17. 2017. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified soil classification system), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, s. 1-10. DOI: 10.1520/D2487-17
- [24] ASTM D698-12. 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, s. 1-13. DOI: 10.1520/D0698-12E02
- [25] ASTM D3080/D3080M-18. 2018. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, s. 1-9. DOI: 10.1520/D3080
- [26] ASTM D2435/D2435M-11. 2020. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, s. 1-15. DOI: 10.1520/D2435\_D2435M-11
- [27] Wersin, P., Johnson, L.H., Snellman, M. 2006. Impact of Iron Released from Steel Components on the Performance of the Bentonite Buffer: A Preliminary Assessment within the Framework of the KBS-3H Disposal Concept, Cambridge, MRS Online Proceedings Library, 932, 1171. DOI: 10.1557/proc-932-117.1
- [28] Wang, S., Zhu, W., Qian, X., Xu, H., Fan, X. 2017. Temperature Effects on Non-Darcy Flow of Compacted Clay, *Applied Clay Science*, Cilt. 135, s. 521-525. DOI: 10.1016/j.clay.2016.09.025
- [29] Hong, Z. S., Bian, X., Cui, Y. J., Gao, Y. F., Zeng, L. L. 2013. Effect of Initial Water Content on Undrained Shear Behaviour of Reconstituted Clays, *Géotechnique*, Cilt. 63(6), s. 441-450. DOI: 10.1680/geot.11.p.114
- [30] Yavari, N., Tang, A. M., Pereira, J.-M., Hassen, G. 2016. Effect of Temperature on the Shear Strength of Soils and the Soil-Structure Interface, *Canadian Geotechnical Journal*, Cilt. 53(7), s. 1186-1194. DOI: 10.1139/cgj-2015-0355
- [31] Tschauferer, P., Parker, S.C. 1995. Thermal Expansion Behavior of Zeolites and AlPO<sub>4</sub>s, *The Journal of Physical Chemistry*, Cilt. 99(26), s. 10609-15. DOI: 10.1021/j100026a026
- [32] Keren, R., Mezuman, U. 1981. Boron Adsorption by Clay Minerals Using a Phenomenological Equation, *Clay and Clays Minerals*, Cilt. 29, s. 198-204. DOI: 10.1346/CCMN.1981.0290305
- [33] Shi, J., Shu, S., Ai, Y., Jiang, Z., Li, Y., Xu, G. 2021. Effect of Elevated Temperature on Solid Waste Shear Strength and Landfill Slope Stability, *Waste Management & Research*, Cilt. 39(2), s. 351-359. DOI: 10.1177/0734242X20958065



RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALESİ

## Gravity Tensors and Moho Depth Variations of the Region between West Italy and Eastern of Caspian Sea

### Batı İtalya ile Hazar Denizi Doğusu Arasındaki Bölgenin Gravite Tensörleri ve Moho Derinlik Değişimleri

Fikret Doğru<sup>1\*</sup>, Oya Pamukçu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Atatürk Üniversitesi Oltu Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü, Erzurum, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Corresponding Author / Sorumlu Yazar\*: fikretdogru@atauni.edu.tr

#### Abstract

The crust structure of the region from the west of Italy to the east of the Caspian Sea was examined within the scope of this study. In addition, the effect of both the shallow and deep structure were revealed by calculating the gravity tensors of the region in different degrees. For this purpose, the spherical free air gravity anomaly of the region was first calculated. The combination of EGM2008 and GOCE DIR R4 models were used for this calculation. Then the gravity tensors of the region were calculated separately using only EGM2008 model and only GOCE DIR R4. The spherical free air anomaly of the region was calculated using the topographic model. The spherical Bouguer anomaly of the region was obtained by subtracting the anomaly obtained from this topographic model from the spherical free air anomaly obtained from GOCE DIR R4 + EGM2008 combined model. The radial averaged power spectrum of the spherical Bouguer anomaly was taken and the anomaly thought to be caused by Moho was filtered out. Moho depth map of the whole region was obtained by applying the Parker-Oldenburg inversion to the filtered anomaly. The obtained values were compared with previous studies and found to be compatible.

**Keywords:** Tensor, GOCE, EGM2008, Bouguer, Moho.

#### Öz

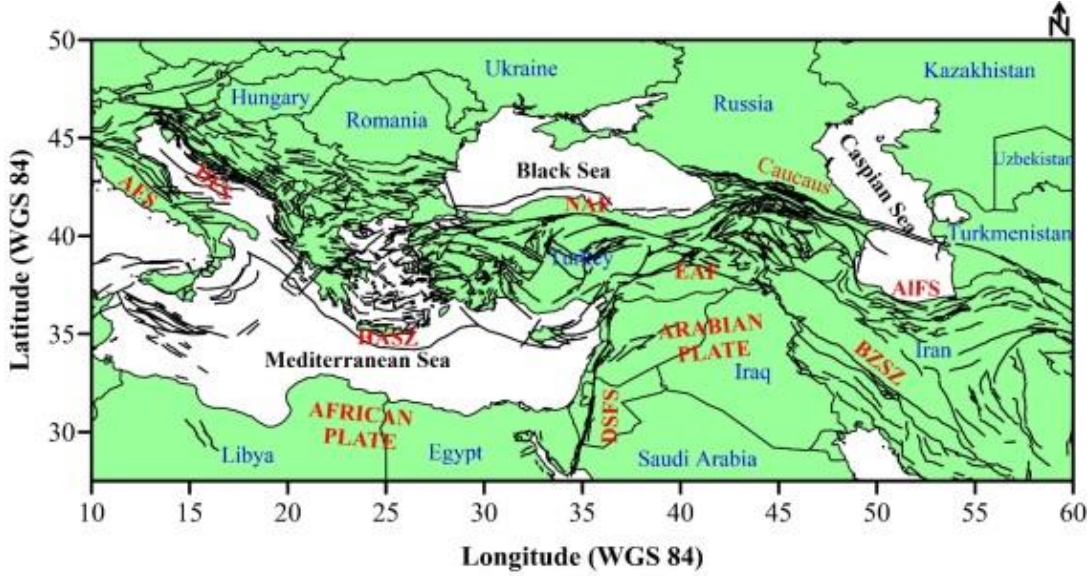
İtalya'nın batısından Hazar Denizi'nin doğusuna kadar olan bölgenin kabuk yapısı bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Ayrıca bölgenin farklı derecelerdeki gravite tensörleri hesaplanarak hem sığ hem de derin yapının etkisi ortaya konulmuştur. Bu amaçla öncelikle bölgenin küresel serbest hava gravite anomalisi hesaplanmıştır. Bu hesaplama için EGM2008 ve GOCE DIR R4 modellerinin kombinasyonu kullanılmıştır. Daha sonra sadece EGM2008 modeli ve sadece GOCE DIR R4 modeli kullanılarak bölgenin gravite tensörleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Topografik model kullanılarak bölgenin küresel serbest hava anomalisi hesaplanmıştır. Bu topografik modelden elde edilen anomalinin GOCE DIR R4 + EGM2008 birleşik modelinden elde edilen küresel serbest hava anomalisinden çıkarılmasıyla bölgenin küresel Bouguer anomalisi elde edilmiştir. Küresel Bouguer anomalisinin radyal ortalamalı güç spektrumu alınmış ve Moho'nun neden olduğu düşünülen anomali filtrelenmiştir. Bu Moho'nun neden olduğu düşünülen anomaliye ters çözüm uygulanarak tüm bölgeye ait Moho derinlik haritası elde edilmiştir. Elde edilen değerler önceki çalışmalarla karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Tensör, GOCE, EGM2008, Bouguer, Moho.

#### 1. Introduction

In the study area as shown in Figure 1, there are large tectonic lines and local kinematic structures created by these tectonic lines. The region under the influence of the Alpine Himalayan belt from west to east consists of terrestrial and marine parts [1-3]. The Hellenic arc is in a very active region especially in the marine part [4-6]. The western extension tectonics throughout Anatolia, the North Anatolian Fault Zone in the north, the East Anatolian Fault Zone in the southerneast, the Bitlis Zagros

suture zone extending to Iran and the Dead Sea fault in the south are the characteristic tectonic elements of the region. Within the scope of this study, the aim is to examine the continuity of the structures by looking at the area in Figure 1 from a wider perspective. To this end, data gathered from satellite-based gravity models were used.



**Figure 1.** Tectonic framework of the study area (AFS:Apennines Fault System; AIFS: Alborz Fault System; BZSZ: Bitlis Zagros Suture Zone; DSFS: Dinarides Fault System; DSFS: Dead Sea Fault System; EAF: Eastern Anatolia Fault; HASZ: Hellenic Arc Subduction Zone; NAF: North Anatolian Fault) (Global active faults are taken from [7]).

The comparison of satellite based gravity anomaly and terrestrial gravity anomaly at the same elevation was made for the Aegean Sea and western Anatolia by the study of Dogru et al., [8]. In this study, the results show that the lowest root mean square error between satellite based gravity anomaly and terrestrial data was obtained from the combination of GOCE Direct Release 4 [9] and Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) [10]. Therefore, a combination of GOCE Direct Release 4 [9] and Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) [10] models were selected and used to calculate the free air gravity data of the region. Anomaly between the degree of 2-2190 was obtained by calculating the GOCE model up to degree of 240 and using EGM2008 up to the degree of 241-2190. Afterwards, the free air gravity anomaly of the region was calculated from the  $dV\_ELL\_Earth2014\_plusGRS80$  [11] topographic model. Then, topographic free air gravity anomaly was extracted from the spherical free gravity anomaly calculated from GOCE DIR R4 + EGM2008 model. Thus, the spherical Bouguer gravity anomaly of the region was obtained. Finally, the gravity tensors and Moho depth values of the region were obtained. In addition, tensor analysis of EGM2008 and GOCE DIR R4 data was performed and the results were examined among themselves. As a result, the variations in Moho depths and tensor values determined in this study were evaluated together with regional tectonic elements.

**2. Materials and Method**

**2.1. Spherical gravity anomaly calculation**

In this study, free air gravity anomalies are calculated using the following equations [12]:

$$\begin{aligned}
 \Delta g_{sa}(r, \varphi, \lambda) &= -\frac{\partial T(r, \varphi, \lambda)}{\partial r} - \frac{2}{r}T(r, \varphi, \lambda) \\
 &= \frac{GM}{r^2} \sum_{n=n_{min}}^{n_{max}} \left(\frac{R}{r}\right)^n (n-1) \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{n,m} \cos m \\
 &\quad \times + \Delta \bar{S}_{n,m} \sin m \lambda) \bar{P}_{n,m}(\sin \varphi)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

In this formula,  $r$ ,  $\varphi$  and  $\lambda$  are spherical radius, latitude and longitude;  $n$ ,  $m$  are spherical harmonic degrees and order;  $n_{min}$  and  $n_{max}$  are the degree of minimum and maximum spherical harmonic expansion;  $\bar{P}_{n,m}(\sin \varphi)$  is the  $4\pi$  complete normalization associated with the Legendre function;  $GM$  and  $r$  represent the gravity constant of the geocentric and the radius of the reference sphere.  $\bar{C}_{n,m}$  and  $\bar{S}_{n,m}$  are the  $4\pi$  fully normalized spherical harmonic coefficients,  $\Delta \bar{C}_{n,m}$  and  $\Delta \bar{S}_{n,m}$  represent the difference between the harmonic coefficients in the gravity model and the harmonic coefficients of the normal gravity field. GrafLab (Gravity field laboratory), which is a MATLAB-based program, was used in the calculation of anomalies [12].

**2.2. Tensors of spherical gravity anomalies**

Gravity tensors are calculated as shown below [12]:

$$T(r, \varphi, \lambda) = \begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{pmatrix}
 \tag{2}$$

Calculation formulas of gravity tensors are given in the supplementary file.

**2.3. Radial Averaged Power Spectrum**

The most important feature of the radial averaged power spectrum is that it shows the correct changes at different slopes in different radial wave number patterns. Generally, small radial wave numbers are represented by deeper, medium wave numbers by shallow sources and high wave numbers by noise in the data [13-15]. The depth of each equivalent layer is calculated as follows:

$$h = \frac{B(kr_1) - B(kr_2)}{4\pi(kr_2 - kr_1)}
 \tag{3}$$



Here;  $kr_1$  and  $kr_2$  are the starting and ending radial wave numbers of the overlapping line,  $B(kr_1)$  and  $B(kr_2)$  are the radial averaged natural logarithmic power spectrum values corresponding to these wave numbers [16]. The radial amplitude (A) is calculated as the averaged of the 2D Fourier amplitude spectrum (F) with radius  $kr = [k_x^2 + k_y^2]^{1/2}$  centered at the starting point and expressed as  $A = |F| = [Re(F)^2 + Im(F)^2]^{1/2}$  [17-18].

#### 2.4. Parker-Oldenburg inversion

Parker-Oldenburg algorithm was applied to the spherical Bouguer anomaly obtained as a result of bandpass filter by using  $kr$  values in the previous application [19-20]. The Fourier transform of spherical Bouguer gravity anomalies ( $\Delta g_{BA}$ ) is obtained using the equation proposed by Parker [19]:

$$\mathfrak{F}(\Delta g_{BA}) = -2\pi G \rho e^{(-kz_0)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^{n-1}}{n!} f[h^n(x)] \quad (4)$$

Here,  $\mathfrak{F}(\Delta g_{BA})$  represents the Fourier transform of the gravity anomaly,  $G$  universal gravitational constant,  $\rho$  density contrast,  $k$  wave number,  $h^n(x)$  downward continuation depth and  $z_0$  mean depth. Oldenburg [20] rearranged equation (4) to determine the depth of the structure from the gravity anomaly iteratively:

$$\mathfrak{F}[h(x)] = -\frac{\mathfrak{F}[\Delta g(x)]e^{(-kz_0)}}{2\pi G \rho} - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{k^{n-1}}{n!} f[h^n(x)] \quad (5)$$

#### 2.5. Upward continuation

Upward continuation is a method that transforms anomalies measured on one surface into those that would have been measured on some higher surface. The upward-continued anomalies do not provide direct information about the source, but they can be instructive nonetheless. In particular, the process of upward continuation tends to attenuate anomalies caused by local, near-surface sources relative to anomalies caused by deeper, more profound sources. The potential data at

two observation heights are related by the upward continuation operation [21],

$$T_h(x, y, \Delta h) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{T_o(x', y', \Delta h)}{[(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + \Delta h^2]^{3/2}} dx' dy' \quad (6)$$

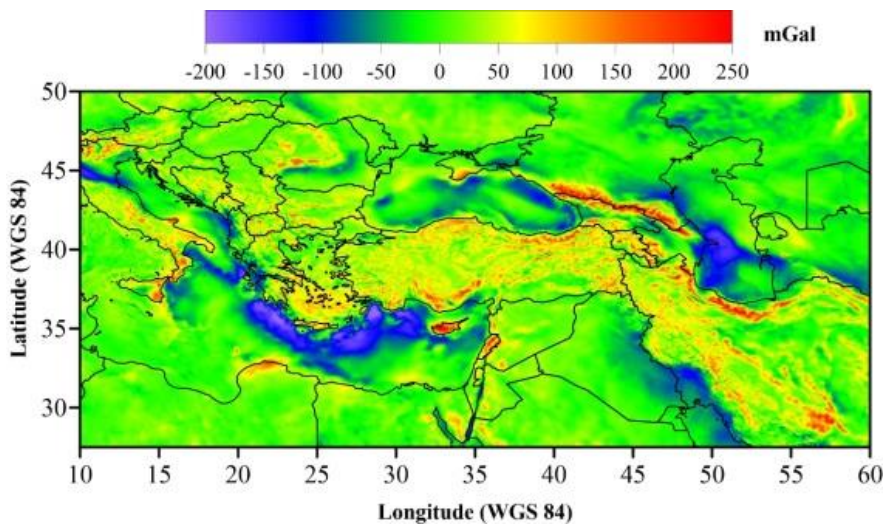
where  $T_o(x, y)$  and  $T_h(x, y, h)$  are respectively the potential data at two observation heights separated by a vertical distance  $\Delta h$ . Applying a two-dimensional Fourier transform to equation (6) yields a simpler form in which the Fourier transforms of the two quantities are related to each other by a simple upward continuation operator,

$$\tilde{T}_h(\omega_x, \omega_y, \Delta h) = e^{-\Delta h \omega_r} \tilde{T}_o(\omega_x, \omega_y) \quad (7)$$

Where  $\tilde{T}_o(\omega_x, \omega_y)$  denotes the Fourier transform of  $T_o(x, y)$ ,  $(\omega_x, \omega_y)$  are wavenumbers in  $x$  and  $y$  direction and  $\omega_r = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}$  is the radial wavenumber. The upward continuation operator attenuates with height the high frequency content of a potential anomaly.

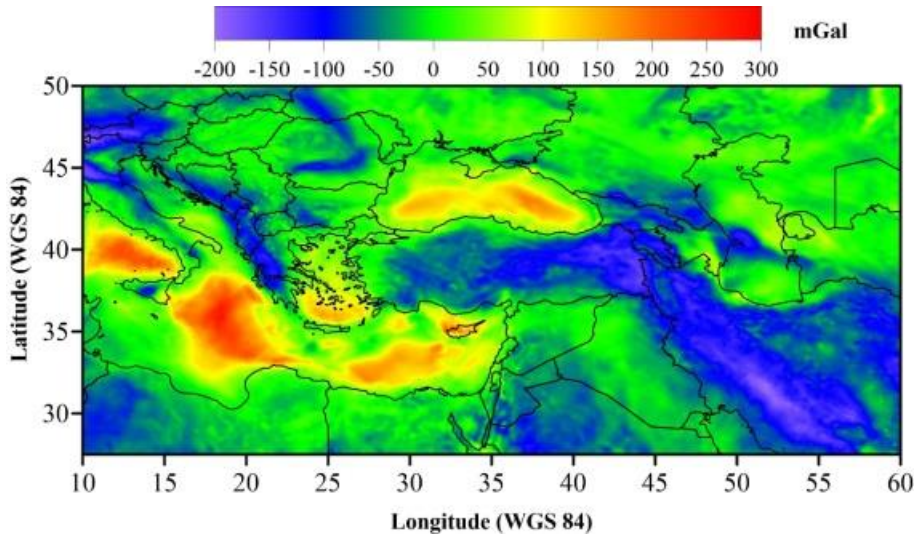
### 3. Results

First of all, the spherical free air anomaly of the area in Figure 1 was calculated (Figure 2) and then the Bouguer anomaly was calculated using the topography model (Figure 3). The topographic elevation values of the region reach up to 5000 meters. Spherical free air anomaly values vary between 250 mGal and -200 mGal. It is seen that spherical free air anomalies were obtained positive high values especially in the Caucasus where the topographic height is high, along the Iran-Caspian Sea coast and in the vicinity of Cyprus. Spherical free air anomalies were observed negatively in the sea areas as expected. Spherical Bouguer gravity anomaly values vary between 280 mGal and -200 mGal. Contrary to spherical free air anomalies, positive high values were observed in seas and negative anomalies were observed in lands.



**Figure 2.** Spherical free air gravity anomaly with the combination of EGM2008 and GOCE DIR R4 model.

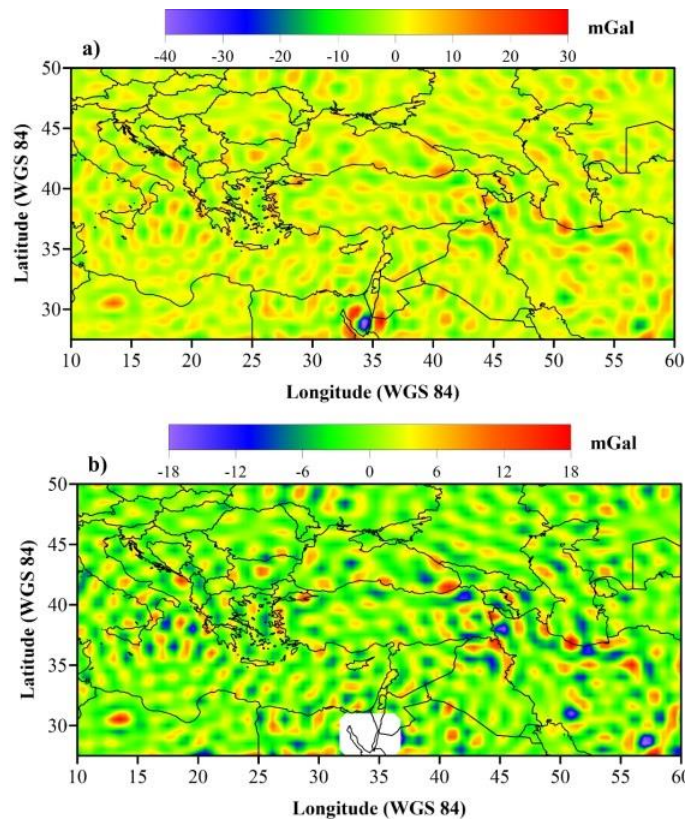




**Figure 3.** Spherical Bouguer gravity anomaly of the study area.

Afterwards, the difference between EGM2008 and GOCE DIR R4 models up to 240 degrees/order (2 to 240) was calculated for the whole region (Figure 4). It is seen that values are between -

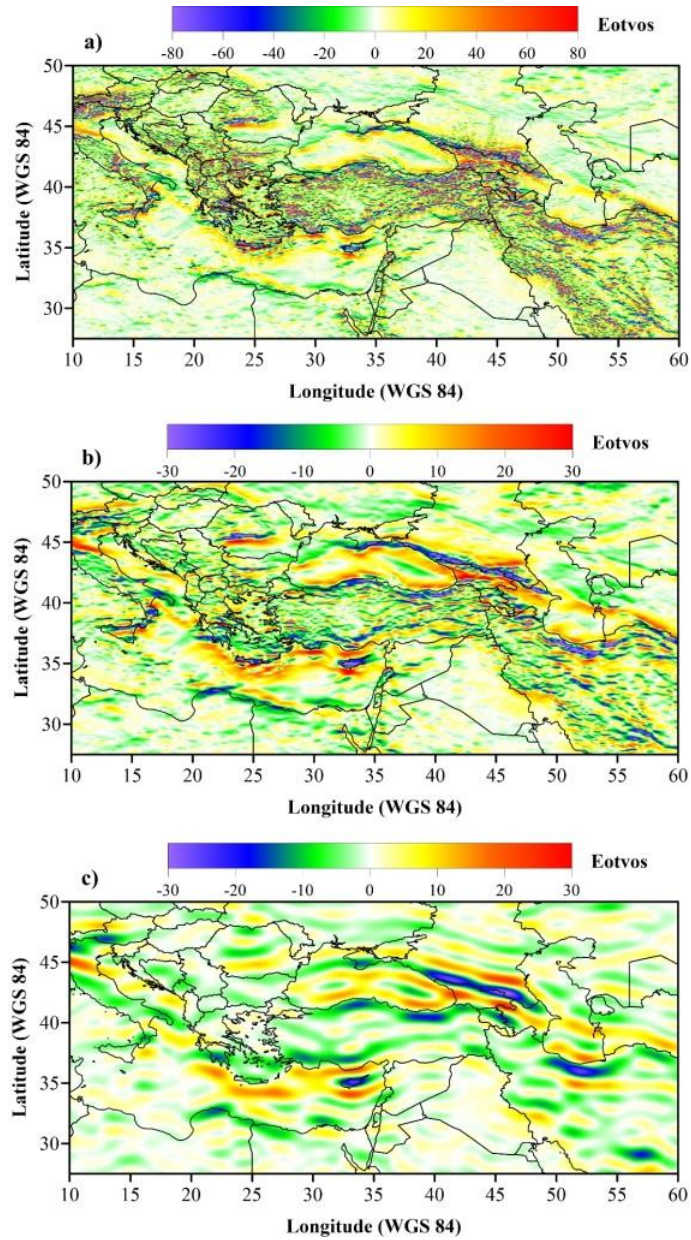
40 and +30 in eastern Egypt and in southwest Israel but when this anomaly was eliminated values are between approximately -18 and +18 in the rest of the region.



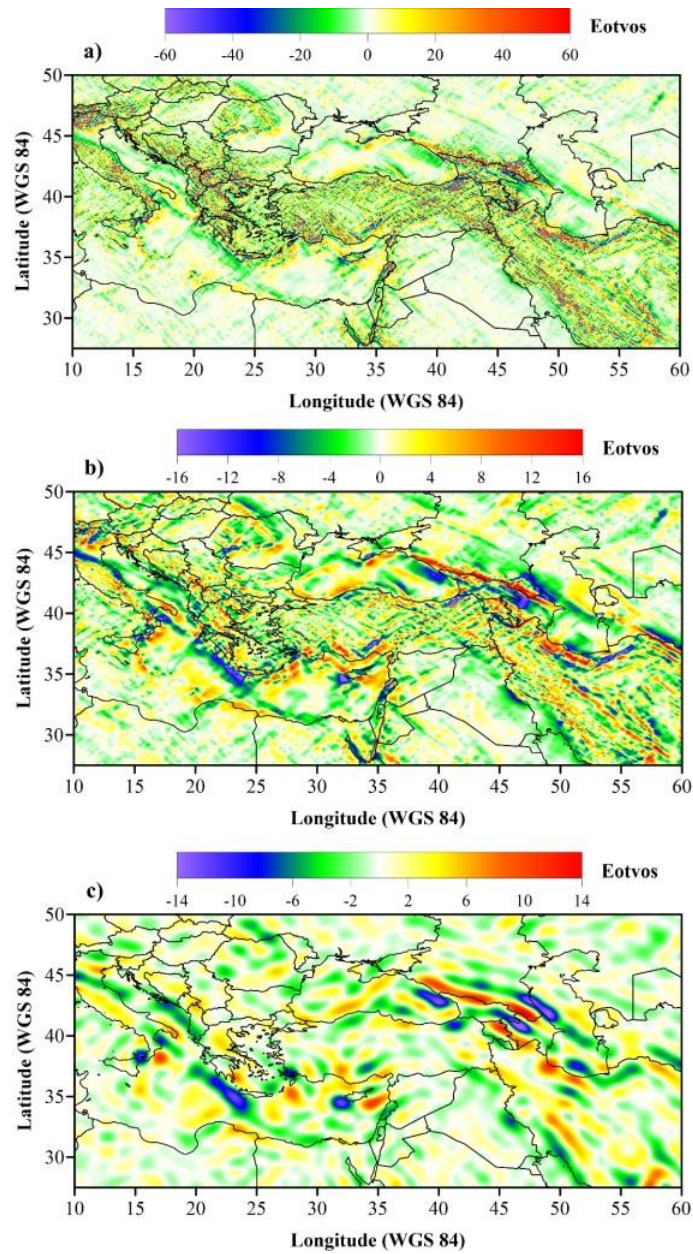
**Figure 4.** a) The difference between EGM2008 and GOCE DIR R4 (up to degree/order 2 to 240) and b) maximum value area middle in the South is blanked to show maximum and minimum difference of the whole area.

Gravity tensors were first calculated from the satellite model of EGM2008 (Figures 5a, 6a, 7a, 8a, 9a and 10a). In addition, upward extension was applied to the EGM2008 tensor data (Figures 5b, 6b, 7b, 8b, 9b and 10b). In addition, tensors have been calculated from GOCE Direct model (Release 4) up to

degree/order 2 to 240 (Figures 5c, 6c, 7c, 8c, 9c and 10c). In this way, both tensors of deep structure effects originating from low frequency and wide wavelength and tensors of shallow structure effects originating from high frequencies and short wavelengths were obtained.

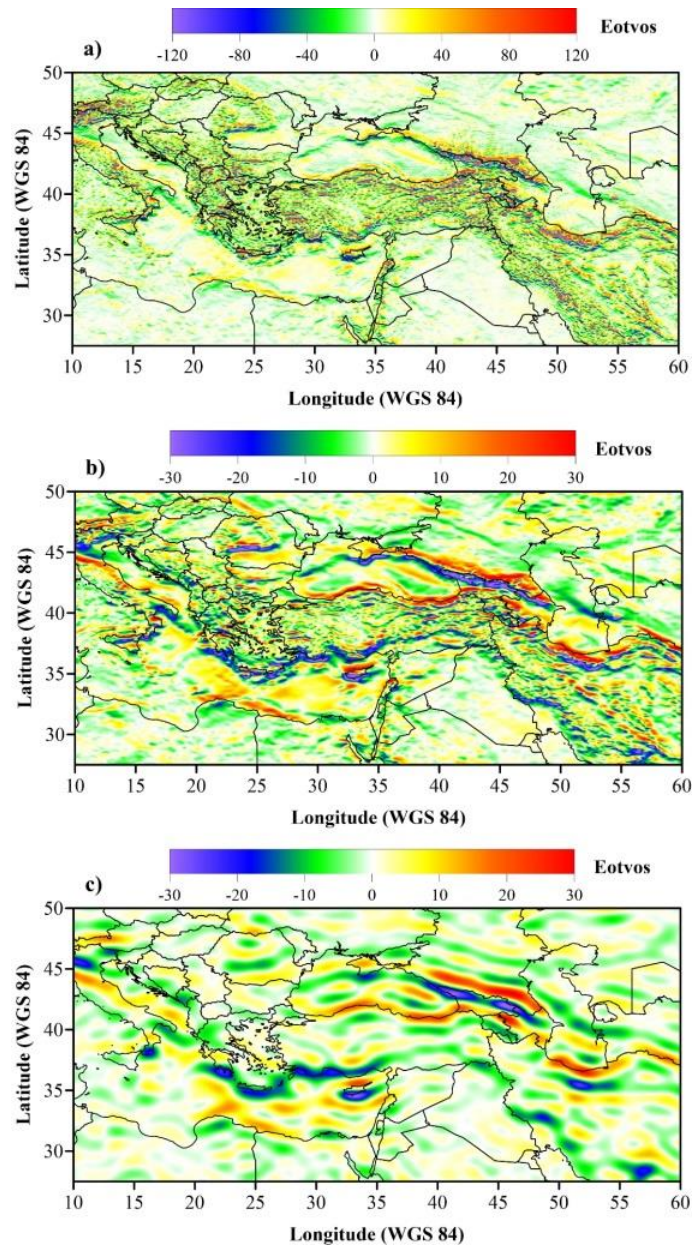


**Figure 5.** a) Txx tensor of EGM2008 up to degree 2190, b) Upward continuation of Txx tensor of EGM2008 and c) Txx tensor of GOCE DIR R4 up to degree 240.

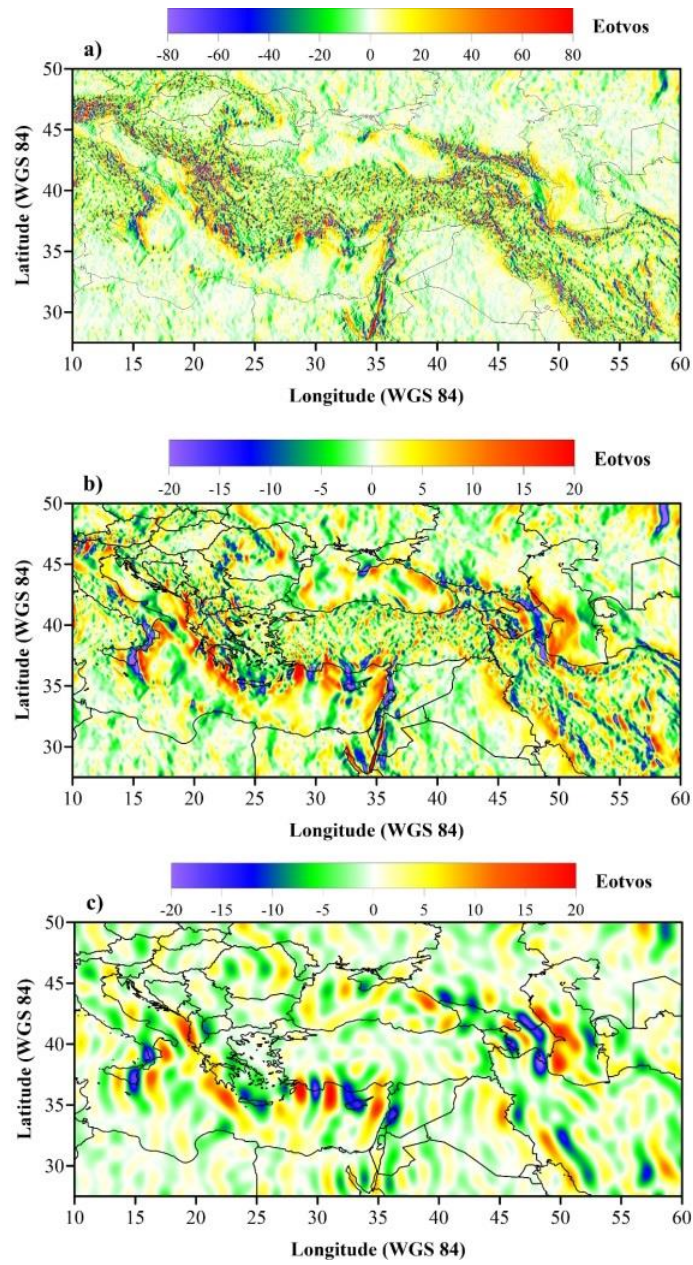


**Figure 6.** a) Txy tensor of EGM2008 up to degree 2190, b) Upward continuation of Txy tensor of EGM2008 and c) Txy tensor of GOCE DIR R4 up to degree 240.

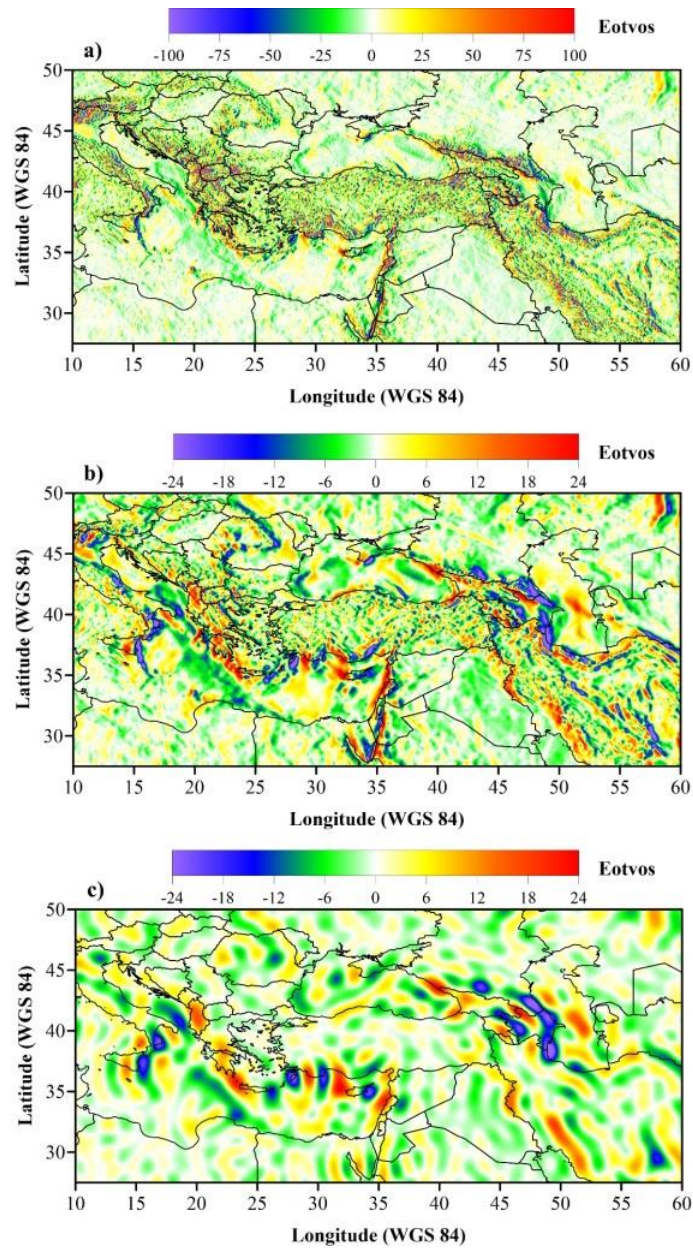




**Figure 7.** a) Txz tensor of EGM2008 up to degree 2190, b) Upward continuation of Txz tensor of EGM2008 and c) Txz tensor of GOCE DIR R4 up to degree 240.

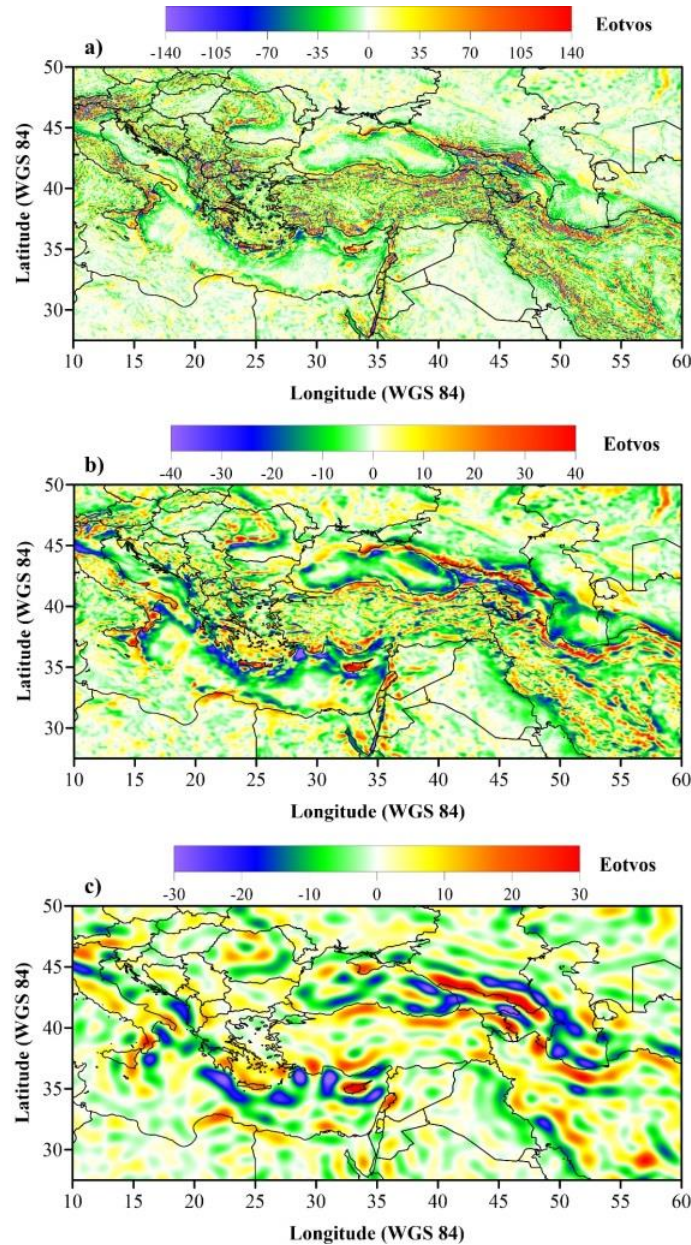


**Figure 8.** a) Tyy tensor of EGM2008 up to degree 2190, b) Upward continuation of Tyy tensor of EGM2008 and c) Tyy tensor of GOCE DIR R4 up to degree 240.



**Figure 9.** a) Tyz tensor of EGM2008 up to degree 2190, b) Upward continuation of Tyz tensor of EGM2008 and c) Tyz tensor of GOCE DIR R4 up to degree 240.





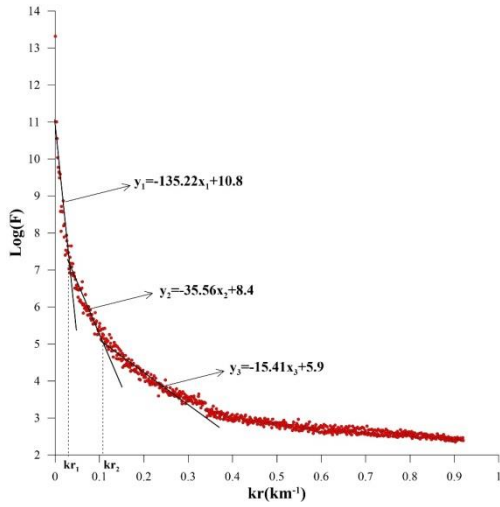
**Figure 10.** a) Tzz tensor of EGM2008 up to degree 2190, b) Upward continuation of Tzz tensor of EGM2008 and c) Tzz tensor of GOCE DIR R4 up to degree 240.

The initial mean depth value is needed for the inversion application of the Moho calculation. The radial averaged power spectrum method was applied in order to obtain the Moho anomaly to be used in the inversion. Critical wave numbers are important in determining bandpass limits and defined as points where the slope of the lines changes. This wave numbers are respectively,  $kr_1 = 0,025 \text{ km}^{-1}$  ( $\lambda_1 = 2\pi / kr_1 = 251 \text{ km}$ ) and  $kr_2 = 0,106 \text{ km}^{-1}$  ( $\lambda_2 = 2\pi / kr_2 = 59 \text{ km}$ ). From the slopes of these lines, the average depths of the interface boundaries were calculated as  $z_1=135 \text{ km}$  (LAS),  $z_2=35 \text{ km}$ , respectively (Figure 11).

After the power spectrum analysis of the spherical Bouguer gravity anomaly and decomposing the anomaly originating from Moho, then Moho depth map was obtained after inversion of this anomaly. The mean depth ( $z_0$ ) approximately as 35 km obtained from the power spectrum analysis is used for the calculation of Moho depth in the 3DINVER program [22]. The

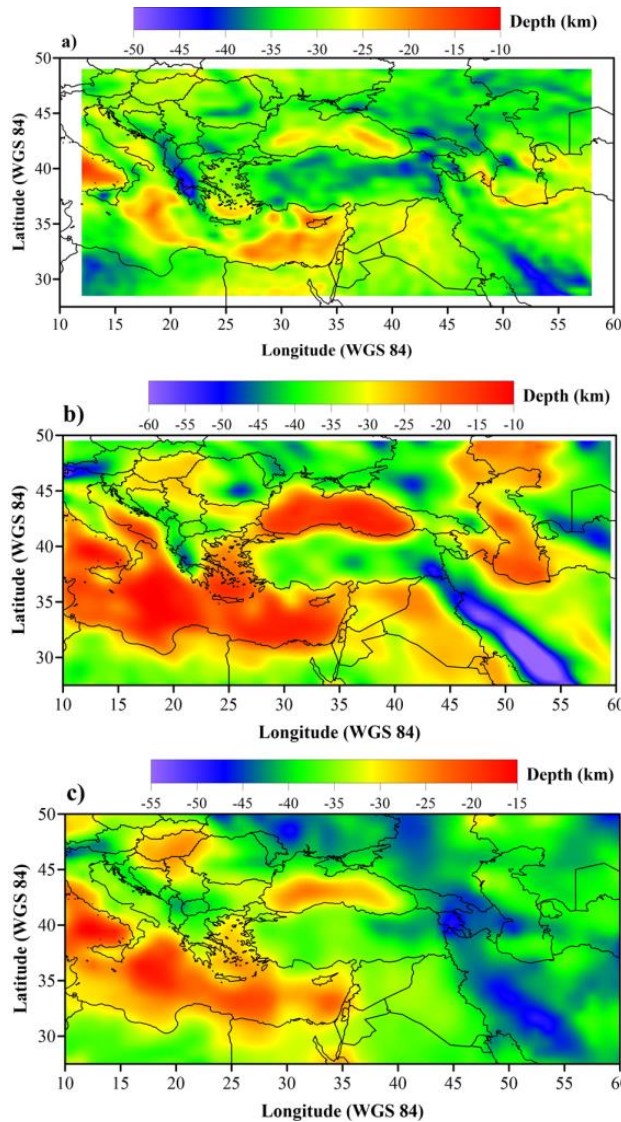
program needs an initial knowledge of two parameters which are density contrast of the interface and the mean depth. Density contrast which is mantle density minus crust density was taken fixed as  $0.4 \text{ g/cm}^3$ . Earth's curvature was ignored as a parameter in the inversion formula for big area calculations but spherical approximation of gravity calculation could be an advantage because the spherical version uses a spherical shell of thickness equal to the orthometric height of the topography at the point of interest [23]. Moho depths were found at an average of 30 km in Western Anatolia, between 20-35 km in the Aegean Sea, between 35-45 km in Eastern Anatolia and between 10-20 km in Cyprus and its surroundings (Figure 12). The Moho variation between the depths of 40-50 km in the southeast of the study area and the Moho depth values of approximately 45 km in the Caucasus are quite compatible with the results of the studies of Lü et al., [24]. Lü et al., [24] obtained Moho depths with Pn seismic wave tomography method in their study. In

addition, the results of the continental crustal thickness in Turkey and its vicinity in the studies of Kayhan and Gülen [25] are in good agreement with the values obtained in this study.



**Figure 11.** Radial power spectrum of Spherical Bouguer gravity anomaly.

The results are coherent with the Moho depth studies which was made in the eastern Anatolia by Pamukçu et al., [26]; in the western Anatolia by Pamukçu and Yurdakul [27] and in the eastern part of Mediterranean Sea by Doğru et al., [8]. In addition, Bilim et al., [28] obtained the crustal results for the Black Sea and the results of this study are compatible with their results. In addition, Moho depths from the GOCE Exploitation for Moho Modelling and Applications Project (GEMMA) [29] which has generated the first global high-resolution map of the boundary between Earth's crust and mantle based on data from the only GOCE satellite and An Updated Global Model of Earth's Crust (CRUST1.0) [30] model which has calculated from active source seismic studies on a 1-degree grid were shown in Figure 12. Although the data acquisitions are completely different, it is noticed that there is more coherence between the Moho depth of CRUST1.0 model and Moho depth obtained in this study especially in the marine areas. It can be said that the Moho depth result of GEMMA model presents best fit for marine areas but the results of Moho depth obtained in this study offers more relevant results especially eastern of Turkey with CRUST1.0 model.



**Figure 12.** Moho depth variations of the study area from this study and other Moho models: a) Moho depth variation from this study, b) Moho depth from GEMMA model and c) Moho depth from CRUST1.0 model.

#### 4. Conclusions

Within the scope of this study, the spherical free air gravity anomaly of the area was first calculated using satellite models. The combination of EGM2008 and GOCE DIR R4 models were used to calculate the spherical free air gravity anomaly. Afterwards, the spherical Bouguer gravity anomaly of the region was calculated with the help of the topography model. In addition, the gravity tensors of the region were calculated with only GOCE DIR R4 model (n: 240) and only EGM2008 (n: 2190) model. Thus, the effect of both deep structures and shallow structures could be observed. The Moho depth map of the study area from the west of Italy to the east of the Caspian Sea was obtained. Moho depth values of the region were obtained between 10 and 50 km. Moho depth values were observed to be compatible with the results of previous studies. Moho values were obtained in the range of 45 km in the Eastern Anatolia Region, around 30 km in the Western Anatolia, ~20 km around Cyprus, and 45-50 km in the south of the Caucasus and Iran (Figure 1).

A significant north-south anomaly variation was obtained especially along the Dead Sea fault, at upward continuation of Tyz and Tyy tensor of EGM2008 (Figures 8 and 9) and Tyz and Tyy tensor of GOCE DIR R4 up to degree 240 (Figures 8 and 9). Although this tectonic element has a predominantly lateral change, it is clear that there is a continuity of mass change in the vertical direction due to the change in the Tyz component.

An anomaly with a sharp positive-negative change in the direction of approximately northwest-southeast draws attention in the results of EGM2008 up to degree 2190, upward continuation of Txx, Txy, Txz, Tzz tensors of EGM2008 and Tzz tensor of GOCE DIR R4 up to degree 240 in Figures 5, 6, 7 and 10 between 35°-55° longitudes throughout the Caucasus (Figure 1). There is both a lateral and a vertical continuation of change along this one line in this area. The line of anomalies changing as smoothly as possible was observed throughout northernwest to southeast trending and even to the Hellenic arc between 10°-25° longitudes in the results of EGM2008 up to degree 2190, upward continuation of Txy, Txz, Tzz tensors of EGM2008 and Tzz tensor of GOCE DIR R4 up to degree 240 in Figures 6, 7 and 10. This line also has the character of lateral and vertical change. However, the difference between this place and the Caucasus is that the positive-negative anomaly transition is not sharp.

In addition, negative amplitude changes in a wide area along the Hellenic arc in Figures 7 and 10 was observed in the results of EGM2008 up to degree 2190, upward continuation of Txx, Tzz tensors of EGM2008 and Txx, Tzz tensors of GOCE DIR R4 up to degree 240. The vertical continuity of the main character here reflects the subduction characteristics of the region very well. From this point of view, it is observed in Figures 7 and 10 that the line on which this tectonic element extending has continuity along the Mediterranean in the south of Anatolia. In fact, the anomaly amplitude value of this line increases in the positive direction and joins with the Bitlis Suture zone in the east in Figure 7.

Additionally, when Figure 5b is carefully examined the linear line with an average amplitude of 20 Eotvos coming from the 10° longitude west follows the Hellenic arc again merging with the Bitlis Thrust zone in the east and continues in the east. While Tzz and accordingly Txx variation in the vertical direction from the Hellenic arc is very dominant, the dominance of this line in Tzz in the vertical component cannot be observed when it approaches the Bitlis thrust in the east. Again, it is observed that

there are parallel but same character changes towards Africa, especially around Cyprus in the south of this line (Figure 7).

#### Ethics Committee Approval and Declaration of Conflict of Interest

This article does not require ethics committee approval.

There is no conflict of interest with any person/institution in the prepared article.

#### Acknowledgment

The authors would like to thank the anonymous reviewers for his/her valuable comments.

#### References

- [1] Dewey, J.F., Bird, J.M. 1970. Mountain belts and the new global tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 75(14), 2625-2647. DOI:10.1029/JB075i014p02625.
- [2] McKenzie, D. 1978. Active tectonics of the Alpine—Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. *Geophysical Journal International*, 55(1), 217-254. DOI:10.1111/j.1365-246X.1978.tb04759.x.
- [3] Jackson, J., McKenzie, D. 1984. Active tectonics of the Alpine—Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal International*, 77(1), 185-264. DOI:10.1111/j.1365-246X.1984.tb01931.x.
- [4] Angelier, J. 1978. Tectonic evolution of the Hellenic Arc since the late Miocene. *Tectonophysics*, 49(1-2), 23-36. DOI: 10.1016/0040-1951(78)90096-3.
- [5] Angelier, J., Lyberis, N., Le Pichon, X., Barrier, E., Huchon, P. 1982. The tectonic development of the Hellenic arc and the Sea of Crete: a synthesis. *Tectonophysics*, 86(1-3), 159-196. DOI: 10.1016/0040-1951(82)90066-X.
- [6] Anastasakis, G., Kelling, G. 1991. Tectonic connection of the Hellenic and Cyprus arcs and related geotectonic elements. *Marine Geology*, 97(3-4), 261-277. DOI: 10.1016/0025-3227(91)90120-S.
- [7] Styron, R. 2019. GEMScienceTools/gem-global-active-faults: First release of 2019 (Version 2019.0). Zenodo. DOI:10.5281/zenodo.3376300.
- [8] Dogru, F., Pamukcu, O., Gonenc, T., Yildiz, H. 2018. Lithospheric structure of western Anatolia and the Aegean Sea using GOCE-based gravity field models. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 59(2), 135-160. DOI:10.4430/bgta0231.
- [9] Bruinsma, S.L., Förste, C., Abrikosov, O., Marty, J.C., Rio, M.H., Mulet, S., Bonvalot, S. 2013. The new ESA satellite-only gravity field model via the direct approach. *Geophysical Research Letters*, 40(14), 3607-3612. DOI: 10.1002/grl.50716.
- [10] Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor, J.K. 2008. An earth gravitational model to degree 2160: EGM2008. EGU general assembly, 10, 13-18.
- [11] Rexer, M., Hirt, C., Claessens, S., Tenzer, R. 2016. Layer-based modelling of the Earth's gravitational potential up to 10-km scale in spherical harmonics in spherical and ellipsoidal approximation. *Surveys in Geophysics*, 37(6), 1035-1074. DOI: 10.1007/s10712-016-9382-2.
- [12] Bucha, B., Janák, J. 2013. A MATLAB-based graphical user interface program for computing functionals of the geopotential up to ultra-high degrees and orders. *Computers and Geosciences*, 56, 186-196. DOI: 10.1016/j.cageo.2013.03.012.
- [13] Spector, A., Grant, F. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35, 293-302. DOI: 10.1190/1.1440092.
- [14] Pawlowski, R.S., Hansen, R.O. 1990. Gravity anomaly separation by Wiener filtering. *Geophysics*, 55(4), 539-548. DOI: 10.1190/1.1442865.
- [15] Pawlowski, R.S. 1994. Green's equivalent-layer concept in gravity band-pass filter design. *Geophysics*, 59, 69-76. DOI: 10.1190/1.1443535.
- [16] Sönmez, T. 2016. Doğu Marmara Bölgesinin litosfer dinamiklerinin EGM2008 gravite anomalileri, izostatik ve termomekanik analizlerle araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli.
- [17] Bhattacharyya, B. 1967. Some general properties of potential fields in space and frequency domain: a review. *Geoexplor.*, 5, 127-143. DOI:10.1016/0016-7142(67)90021-X.
- [18] Ruotoistenmäki, T. 1987. Estimation of depth to potential field sources using the Fourier amplitude spectrum. *Geol. Tutkimusk.*, 340, 84. DOI: 10.13140/RG.2.2.11841.61284.
- [19] Parker, R.L. 1972. The rapid calculation of potential anomalies. *Geophys. J. Int.*, 31, 447-455, DOI:10.1111/j.1365-246X.1973.tb06513.x.

- [20] Oldenburg, D.W. 1974. The inversion and interpretation of gravity anomalies. *Geophys.*, 39, 526-536, DOI:10.1190/1.1440444.
- [21] Blakely, R.J. 1995. *Potential theory in gravity and magnetic applications*, Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9780511549816.
- [22] Gómez-Ortiz, D, Agarwal, B.N. 2005. 3DINVER. M: a MATLAB program to invert the gravity anomaly over a 3D horizontal density interface by Parker–Oldenburg's algorithm. *Computers & geosciences*, 31(4), 513-520. DOI: 10.1016/j.cageo.2004.11.004.
- [23] Vaníček, P., Tenzer, R., Sjöberg, L.E., Martinec, Z., Featherstone, W.E. 2004. New views of the spherical Bouguer gravity anomaly. *Geophysical Journal International*, 159(2), 460-472. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2004.02435.x.
- [24] Lü, Y., Ni, S., Chen, L., Chen, Q.F. 2017. Pn tomography with Moho depth correction from eastern Europe to western China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(2), 1284-1301. DOI: 10.1002/2016JB013052.
- [25] Kayhan, G., Gülen L. 2017. Türkiye ve civarında kıtasal kabuk kalınlığı araştırması. 70th Geological Congress of Turkey, 26-27.
- [26] Pamukçu, O.A., Akçığ, Z., Demirbaş, Ş., Zor, E. 2007. Investigation of crustal thickness in Eastern Anatolia using gravity, magnetic and topographic data. *Pure and Applied Geophysics*, 164(11), 2345-2358. DOI: 10.1007/s00024-007-0267-7.
- [27] Pamukcu, O., Yurdakul, A. 2008. Isostatic compensation in western Anatolia with estimate of the effective elastic thickness. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17(3), 545-557.
- [28] Bilim, F., Aydemir, A., Ateş, A., Dolmaz, M.N., Koşaroğlu, S., Erbek, E. 2021. Crustal thickness in the Black Sea and surrounding region, estimated from the gravity data. *Marine and Petroleum Geology*, 123, 104735. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2020.104735.
- [29] Reguzzoni, M., Sampietro, D. 2015. GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35, 31-43. DOI: 10.1016/j.jag.2014.04.002.
- [30] Laske, G., Masters, G., Ma, Z., Pasyanos, M.E. 2012. CRUST1. 0: An updated global model of Earth's crust. *Geophys Res Abs*, 14, 3743.





RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALESİ

## DEUNET (Dokuz Eylül University Seismological Observation Network): Seismicity of Izmir and Its Surroundings with A New Local Seismic Network in Western Anatolia

### DEUNET (Dokuz Eylül Üniversitesi Sismolojik Gözlem Ağı): Batı Anadolu'da Yeni Bir Yerel Sismik Ağ ile İzmir ve Çevresinin Depremselliği

Elçin Gök <sup>1\*</sup>, Berkay Kalkar <sup>2</sup>, Tevfik Özgür Kurtulmuş <sup>1</sup>, İlknur Kaftan <sup>1</sup>, Zülfikar Erhan <sup>1</sup>, Seçil Turan  
Karaoğlan <sup>1</sup>, Müjgan Şalk <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, TÜRKİYE

Corresponding Author / Sorumlu Yazar \*: elcin.gok@deu.edu.tr

#### Abstract

Local and regional networks are needed to better examine the regions with complex tectonism, such as western Anatolia. Local seismic networks may provide critical data to both scientists and local authorities. They are also required as a base for future early warning systems which Izmir, the largest city in the western Anatolia, does not have one. With the support of Dokuz Eylül University, Engineering Faculty and the Department of Geophysical Engineering the installation of a new local network DEUNET established on February 15, 2019, to obtain new and detailed information about Izmir and its surroundings by observing microearthquake activity as well as major and damaging earthquakes in the region. The obtained maps indicate that the network in this period has the capability to detect and locate local, regional and teleseismic earthquakes occurred. According to the results, an intense seismic activity was observed in the northeast and southwest of the station network from its establishment to the present. These recent active areas affected by two large earthquakes which one is called Aegean Sea – Samos earthquake and the other is Manisa earthquake occurred and affected Izmir City and its surroundings. We also examined the focal mechanism solutions of some recorded earthquakes in this paper. In addition, the ground characteristics of the station locations were examined using the recorded earthquakes. Since Dokuz Eylül University is the only university in Western Anatolia that offers seismology education, this network will also provide significant benefits for seismology education.

**Keywords:** DEUNET, seismic network, earthquake, seismotectonic, seismic activity

#### Öz

Yerel ve bölgesel sismik ağlar, Batı Anadolu gibi karmaşık tektonizmaya sahip bölgeleri daha iyi incelemek için gereklidir. Yerel sismik ağlar, hem bilim insanlarına hem de ilgili makamlara kritik veriler sağlamaktadır. Ayrıca, Batı Anadolu'nun en büyük şehri olan İzmir'de olması gereken erken uyarı sistemleri için bir temel olarak da değerlendirilmektedir. 15 Şubat 2019'da yeni bir yerel ağ olan DEUNET, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi ve Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nde, büyük depremlerin yanı sıra mikro deprem aktivitelerini de gözlemlemek, İzmir ve çevresi hakkında yeni ve ayrıntılı bilgiler elde etmek için kuruldu. DEUNET deprem gözlem ağından elde edilen sonuçlar, bu dönemde meydana gelen yerel, bölgesel ve telesismik depremleri tespit etme ve konumlandırma yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir. Yapılan değerlendirmelere göre DEUNET istasyon ağının kurulumundan günümüze, İzmir İl'inin özellikle kuzeydoğu ve güneybatısında yoğun bir sismik aktivite gözlenmiştir. Gözlemediğimiz yoğun sismik aktivitenin nedeni de; Ege Denizi-Sisam ve Manisa depremlerinden dolayı meydana gelen yoğun artçı aktivitesidir. Bu depremler İzmir İl'i ve çevresini etkilemiştir. Bu çalışma kapsamında istasyon ağı tarafından kaydedilen depremlerin odak mekanizması çözümleri de incelenmiştir. Ayrıca kaydedilen depremler kullanılarak istasyon lokasyonlarının zemin özellikleri araştırılmıştır. Batı Anadolu bölgesinde sismoloji eğitimi veren tek üniversite Dokuz Eylül Üniversitesi olduğundan, bu ağın sismoloji eğitiminde de önemli katkıları olmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** DEUNET, sismik ağ, deprem, sismotektonik, sismik aktivite

#### 1. Introduction

The neotectonism of the western Anatolia is generally explained by the movement of the Anatolian block to the west with respect to the Eurasian plate, and counterclockwise rotation along the Aegean Sea while overlapping it on the Aegean Arc in the southwest direction (Figure 1). The Aegean region has been under a N-S extensional regime since the Miocene while it has

moved westward at a velocity of 2 cm per year due to the convergence of the African and Eurasian plates. Izmir located in the western part of Anatolia contains basin and corresponds approximately to the zone limited by grabens. Due to these movements of Western Anatolia, large and microearthquakes have occurred in Izmir and its surroundings throughout historical and modern time. [1-5]. Many researchers also investigated the seismic activity, tectonism and stress field

DOI:10.21205/deufmd.2024267705

Atf şekli / How to cite:

Gök, E., Kalkar, B., Kurtulmuş, T.O., Kaftan, I., Erhan, Z., Turan, K., Şalk, M. (2024) DEUNET (Dokuz Eylül University Seismological Observation Network): Seismicity of Izmir and Its Surroundings with A New Local Seismic Network in Western Anatolia. DEUFMD, 26 (77), 231-236.

Geliş Tarihi / Received: 30.01.2023

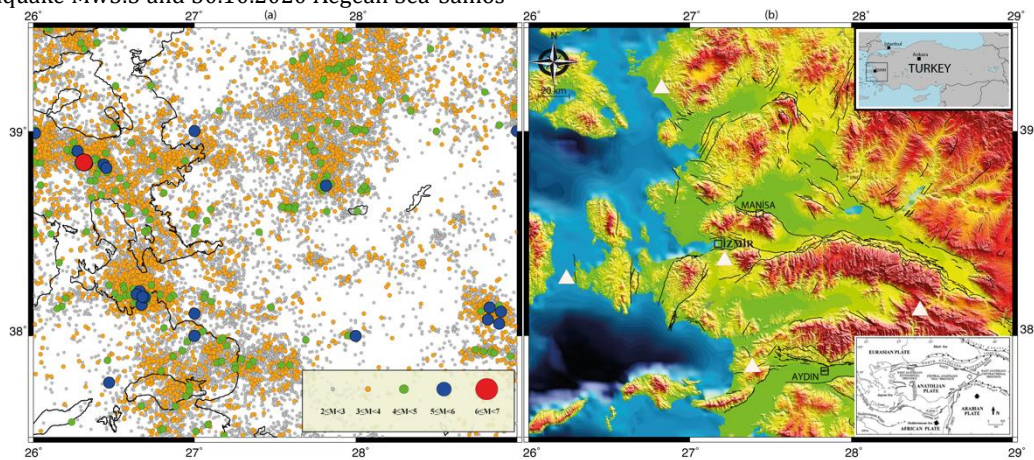
Kabul Tarihi / Accepted: 02.08.2023

around the Aegean Sea and Western Anatolia [6-15]. In Western Anatolia, grabens extending in the E-W direction are limited by normal faults, and the current deformation and related seismicity in the region are controlled by active faults. The magnitudes of earthquakes clustering type in time and space are small and medium [16]. Focal mechanism solutions are also compatible with important geological structures [17-18].

Over a period of about 27 years (Figure 1), the earthquakes in Izmir and its surroundings mostly occur around gulf of Izmir, Aegean Sea, northwest of Izmir and grabens.

Based on the need to observe the microearthquakes occurring in Izmir and its surroundings, the faults threatening the city and to detect the events of the Aegean Sea, the establishment of a local station network was planned in the region. After the installation of the five stations, several large earthquakes, such as 22.01.2020 Manisa-Akhisar earthquake Mw5.4, 26.06.2020 Manisa-Saruhanlı earthquake Mw5.5 and 30.10.2020 Aegean Sea-Samos

earthquake Mw6.9 [20] occurred. Izmir was affected by these earthquakes, and particularly Aegean Sea - Samos earthquake brought about fear and panics, as well as caused damage in some districts of Izmir. These events also proved that it was important to monitor seismicity in the region. Therefore, we installed a permanent five-station real-time broadband seismic network named DEUNET (The Dokuz Eylul University Seismological Observation Network) on February 15, 2019. The aims of the network can be categorized as scientific and educational. On the one hand, the data generated by this network will be used to better identify the seismogenic areas within the region and characterize the seismic sources originated in this area, as well as to study the propagation of seismic waves in Izmir. From the educational point of view, training students by using real earthquake data will be an essential purpose of DEUNET.



**Figure 1.** Recorded seismicity and topographic map of the investigated area (a) earthquake epicenters proportionally between 1992 and early 2019 from AFAD database. (b) locations of the DEUNET stations. Faults are simplified from tectonic map of MTA [19]. The top right corner and the bottom right corner of the inset maps show the study area in Turkey and tectonism of the Anatolian Plate [21], respectively.

## 2. Material and Method

Installation and maintenance of seismic networks are costly. For this reason, we wanted to provide a seismic network to our university by repairing some idle seismometers previously used in portable studies. Instrumentation consists basically CMG-6TD Guralp 30s seismometers. Digitation is obtained through a 24-bit A/D converter, which gives an effective dynamic range of 130 dB for Guralp. In the case of stations equipped with Guralp sensors, their output voltage is proportional to the ground velocity, with flat response between 0.0167 and 50 Hz. To obtain these responses, the signals are sampled continuously at 0.01 Hz, with continuous recording at 100 Hz. The instruments are protected from the environment through a cabin and wire mesh (Figure 2). The sensors are placed on a concrete block, isolated from the environment, and built on bedrock.

To place the stations on a solid ground was our priority. We also considered it best to confine the network within the boundaries of Izmir so that we can observe the earthquakes occurring at the Aegean Sea (Table 1). Considering that the city is under high seismic risk, the locations of the stations were chosen to cover a large part of Izmir Metropolitan.



**Figure 2.** Instruments of the DEUNET seismic network (station installation).

Associated with the sensors, there is an electronic set composed of solar energy control module with solar panels, battery chargers, port server for modem communication and GPS antennas, digitizer CMG-EAM and protectors for both high voltage and lightning. Data are sent with internet (3G/4G) in real time by router to server and workstation in Seismology Laboratory of the Department of Geophysical Engineering (Figure 3). Phase picking, computing magnitude and the location



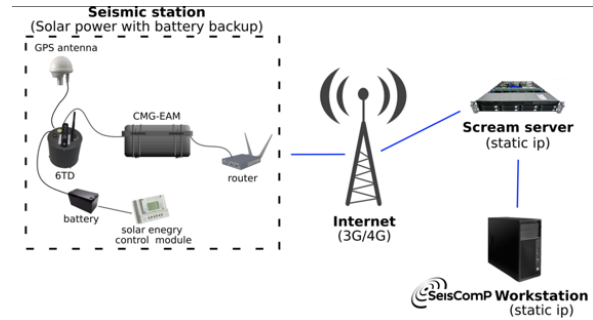
of the earthquakes were managed by careful inspection with SEISAN software [22].

The DEUNET database includes continuous data with the raw data of gcf format and archived by a server during real-time data acquisition. We also use SAC, ASCII formats to analyze the data for different studies. The continuous data are also displayed on the web page of our department as drumplots (<http://jeofizik.deu.edu.tr/en/deunet/>).

**Table 1.** Geographic coordinates and elevations of the DEUNET stations and the sensor type.

Code	Province	Elevation (m)	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Sensor Type
DCES	Cesme	40.1	38.279266	26.233676	30s-100Hz
DDKL	Dikili	122.6	39.206848	26.823387	30s-100Hz
DEUN	Buca	236.3	38.369015	27.214154	30s-100Hz
DKRZ	Kiraz	782.4	38.124343	28.426597	30s-100Hz
DSLÇ	Selçuk	204.5	37.845751	27.386309	30s-100Hz

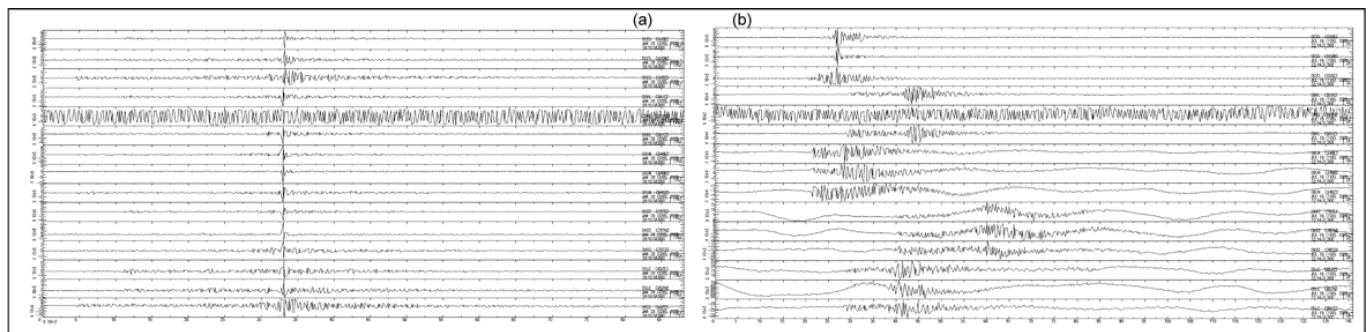
Automatic processing is in the stage of the integration with SEISCOMP 4 to analysis our real time data and alert phase of the DEUNET network (Figure 3,[23]).



**Figure 3.** Schematic view of data flow of the DEUNET and real time data acquisition from five stations to the Seismological Laboratory of the Department of Geophysical Engineering

The quality of data is the main concern. In general, the records from at least five stations are used to provide an accurate location of an earthquake. When this requirement is not met, the errors will be numerous. For this reason, we make calculations based on at least five stations to minimize RMS. The data is exchanged with national seismic network AFAD [20] via a protocol. We are also willing to work with international seismic networks.

The network’s detection capability of local and teleseismic events is illustrated in Figure 4. The first event is the north Karaburun earthquake with a local magnitude of  $M_L$ 3.6, and the second one is the Jamaica earthquake which is a teleseismic earthquake with magnitude  $M_w$ 7.7 occurred in NNW of Lucea, Jamaica.



**Figure 4.** (a) 19.05.2019  $M_L$ 3.6 North Karaburun (South of Lesbos Island) earthquake (b) 28.01.2020,  $M_w$ 7.7 teleseismic earthquake NNW of Lucea, Jamaica

In this study, we investigated site properties of station locations using local earthquakes recorded by DEUNET to ensure the location of the stations and reveal the quality of data. We analyzed site transfer functions of the stations using the horizontal-to-vertical spectral ratio (H/V) method. We selected the S-wave phase from three-component earthquake records with the appropriate azimuthal distribution, and then computed the Fourier amplitude spectra. The magnitudes ( $M_L$ ) and epicenter distances of 53 earthquakes recorded in the network vary between 4.0 and 5.3, and 20 and 300 km, respectively. We observed different amplifications according to the site characteristics and illustrated these amplifications for different selected frequencies. Site function estimates reveal that there are significant amplifications in specific frequency ranges at some investigated sites.

**3. Results**

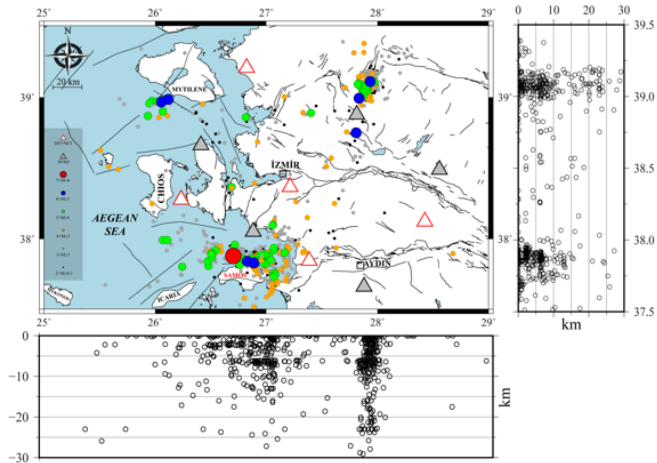
Since the installation of the DEUNET, many earthquakes have been recorded. The whole dataset is composed of 1136 events with the magnitudes ranging from 0.9 to 7.7 for local and distant earthquakes. Without the DEUNET it would not be possible to record the local seismicity of low magnitude ( $0.9 \leq M < 3$ ) in the

Izmir Metropolitan area. As a result of the restriction of at least five station readings, the locations of 665 earthquakes recorded were characterized by an RMS of less than 0.2 s (Figure 5).

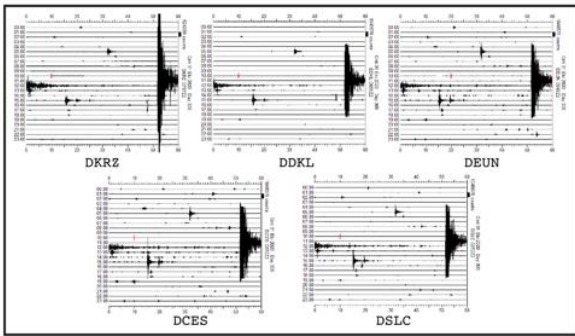
We have added the five AFAD stations to our local network to improve our solutions from February 2021 as seen on the Figure 5 with gray triangles. Seismicity recorded by DEUNET has illuminated major seismic areas inside the study area. These major seismic areas are Manisa and Aegean Sea – Samos earthquakes and their aftershocks. These two earthquakes strongly dominate the seismicity shown in this figure. After a five-month earthquake sequence in Manisa, an earthquake occurred in the north of the island of Samos which is devastating for Izmir. On October 30, 2020 at 11:51 UTC, a  $M_w$  6.9 earthquake struck Izmir, starting a sequence that is still ongoing while we are preparing this paper.

Figure 6 shows the record of this earthquake, with the epicenter off the coast of Kusadasi. It was also recorded by several national stations including AFAD (Republic of Turkey Ministry of Interior Affairs Disaster and Emergency Management) and KOERI (Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute) (<http://www.koeri.boun.edu.tr/scripts/1st8.asp>). Our network

has been clipped because we are very close to the earthquake, we only have the image of it as drumplots (Figure 6).



**Figure 5.** Seismicity recorded by DEUNET along the period of February 2019– August 2022 with longitude and latitude depth sections.



**Figure 6.** DEUNET drumplots of the 30 October 2020 11:51 UTC Aegean Sea - Samos earthquake

The Aegean Sea-Samos earthquake is thought to be caused by 30 km rupture on the Samos Fault. 117 citizens lost their lives and, 1032 were injured in a densely populated neighborhood in Bayraklı district due to the damage and the collapsing of the buildings by earthquake-related ground motions. The most remarkable features of this earthquake are the destruction it has caused at a location approximately 70 km far away from the earthquake epicenter, and the damages by the earthquake-induced tsunami waves along the shoreline of Seferihisar district, as reported by national agencies [20].

5099 aftershocks over a period of 41 days after the earthquake were reported by national institutes. The aftershock distributions indicate that there are some diffused seismic activities in the region (Figure 5). The focal depths of the aftershocks are observed down to about 15 km. This distribution of the aftershocks implies that the source was an E-W trending normal fault. At the easternmost of the island with a normal fault, depth of the events reach about 15 km. Earthquake distributions were also present on the right-lateral fault, but the large amount of the aftershocks occurred at the west of the Samos Fault.

There are also some diffused seismic activity inner and outer Bay of Izmir, north of the Karaburun Peninsula and Cesme area. We also observed some activity north of the study area and around Izmir City center. The seismic activity of the southwest of the Mytilene Island is also possible the ongoing movement of the

aftershocks of  $M_w6.2$  Mytilene earthquake that occurred on June 12, 2017.

Based on the latitude and longitude depth sections, it is possible to limit the depths of the earthquakes occurring in the region to the first 30 km of the earth's crust. The events concentrated in the south of the Izmir and north-east of the study area have focal depth estimations less than 10 km. Two clusters are observed at the depth sections: (1) NE of the Izmir City; this activity is related with the Manisa earthquakes, and its aftershocks are concentrated with point-source model at depths mostly to 10 km and (2) activity of south of Izmir, that is north of the Samos Island; related with the Aegean Sea – Samos earthquake. The hypocenters of this cluster are diffused compared to the seismic activity of Manisa could be related to the Samos Fault.

To examine the seismic movements affecting the study area in more detail, the focal mechanism solutions of earthquakes with a  $GAP < 200^\circ$  were calculated. The seismotectonic of the region were investigated by including AFAD stations to our solutions, using the FOCMEC algorithm [24] with polarity and amplitude ratios. We used the FOCMEC to find best-fit focal mechanisms, with calculated the double couple earthquake focal mechanisms using polarities and amplitude ratios. With this method, we tried to overcome the multi-solution problem caused by our small number of stations.

We determined that most of the seismicity in the region tends to concentrate near the normal faults. In addition to normal faulting systems, we detected strike-slip faults and small amount of reverse-slip fault mechanism. In Figure 7, the red line shows the focal mechanism of the Samos earthquake, the other two gray line next to red line are the focal mechanisms of the two large aftershocks that occurred after the main shock that three solutions of them are taken from the AFAD. Focal mechanism solutions of other earthquakes that occurred in the north and east of Samos Island. The other aftershocks located to the east of the main shock have analyzed with DEUNET stations that normal and reverse fault mechanisms with strike-slip component are observed in and around Kusadasi Bay.

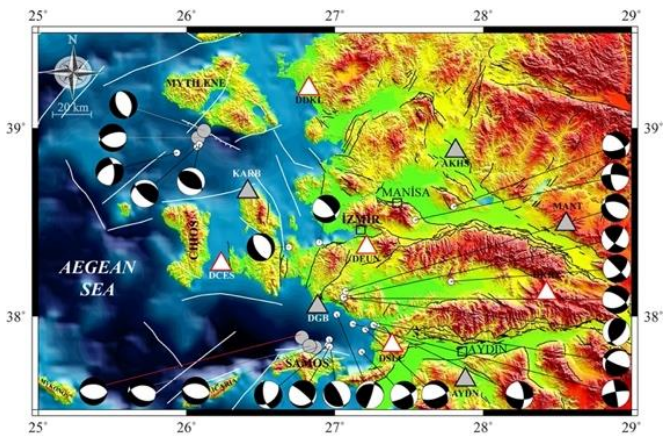
Results of 30 October 2020 11:51 UTC Aegean Sea - Samos earthquake ( $M_w6.9$ ) and its aftershocks from analysis DEUNET stations. The focal mechanism solutions of the mainshock and two biggest aftershocks illustrated from report of AFAD 2020. Faults lines are shown from GEM fault database [28]. Red line triangles show DEUNET stations, while gray triangles show AFAD stations.

Earthquakes that are located in the south of the Mytilene Island were also evaluated and focal mechanism solutions indicated in Figure 7. These earthquakes with different mechanisms were detected because of the earthquake activity that occurred on February 1, 2021, in the nearby location of the Mytilene earthquake with a magnitude of  $M_w6.2$  in 2017. While three of these are normal faults with strike-slip component, two of them are reverse faults with strike-slip component.

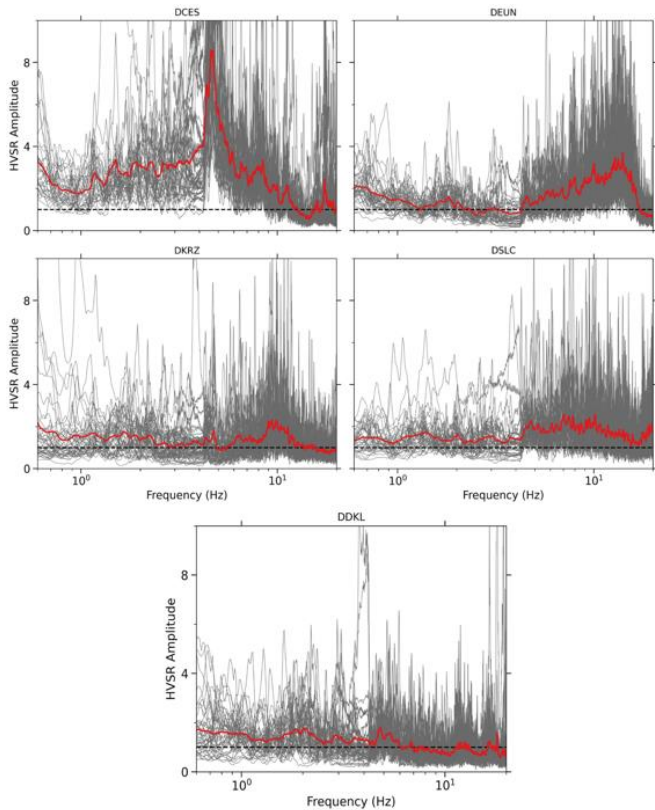
The site characterization estimations made using 53 earthquakes selected in DEUNET database reveal that there are significant amplifications in certain frequency ranges in the DCES station. In general, although there are slight differences between the results of the shapes of the transfer functions in all cases. An increase in amplitude was observed at high frequencies the DEUN station. In this study, amplitude increases were not observed in the other stations (DKRZ, DSLC and DDKL). However, after that first peak, the amplitude of the noise HVSR decreases and no information is retrieved for amplification observed at higher frequencies in the



earthquake data (Figure 8). This problem had been already signaled in [29].



**Figure 7.** Representation of the focal mechanism solutions of 26 earthquakes with magnitudes ranging from  $2.3 \geq M \geq 7$  [25-27].



**Figure 8.** Site functions obtained by the horizontal-vertical spectral ratio method. The gray lines show the horizontal-vertical spectral ratio of each earthquake, and the red lines show the average H/V functions.

**4. Discussion and Conclusion**

A new Seismological Network (DEUNET) installed in February 2019 and started to record events, drastically improved seismic monitoring in Izmir as well as in Western Anatolia. Firstly, it supplies continuous earthquake records with high-quality data, thus it creates new understandings into the regional and local seismic activity. It allows us to determine the earthquake parameters of each event (location, focal mechanism, magnitude and depth) more accurately. In addition, the new network will provide an efficient tool for seismic analysis and crustal investigations. This network enabled us to obtain more accurate

information about the mantle and crustal structures of the Izmir and its surroundings and to investigate the mechanism of the formation of the Western Anatolia.

The seismicity recorded by the network was analyzed to preliminarily results the seismic activity of the region. Our findings indicate a steady rate of seismicity up to the destructive event. The resulted seismicity maps show that the network can cover most of Izmir and Aegean Sea, in accordance with the purpose of establishing the DEUNET. Also, the network in the examined period has the capability to detect and/or locate local and teleseismic earthquakes. It also records microseismic activity, particularly magnitudes less than 3, which is not observed by the national stations in the area. Compared to other national networks, we focus more on the seismic activity of the region as we are a local seismic network. While doing this, unlike others, we do not fix our earthquake depths and we do it using a velocity model belonging to our region [30]. In addition, we keep the RMS of our earthquakes below 0.2 s compared to other institutions.

Since the installation of DEUNET Seismological Observation Network, we have been able to observe the destructive and intense earthquake activity in Izmir and its surroundings. Despite clipping our stations due to proximity to the earthquake we couldn't analyze the main shock and two major aftershocks, we reviewed other aftershocks and tried to learn about the mechanism of the earthquake. The distribution of aftershocks has progressed towards the east of Samos Island in time and continues around the Kusadasi Bay. Depth sections of longitude and latitude also gave results supporting the east-west extension of the Samos fault.

Western Anatolia has the potential to produce destructive earthquakes, exclusively in Izmir and its surroundings. With the help of DEUNET, we can present and contribute concrete data about the seismicity of the region. Our results enable more precise hypocentral locations in assigning zones of active tectonics. On the other hand, especially considering the differences in focal mechanisms in the offshore earthquakes, seismological studies that will be carried out integrated with marine seismic studies will reveal the unknown about the submarine fault structure.

The site transfer functions obtained by the H/V method reveal that there are different amplifications at different frequency values. It is thought that this situation changes depending on the ground characteristics of the station locations. However, to reach the actual amounts of these amplification values, it is necessary to investigate and develop the results with different methods. We plan to improve our site effect estimates and the site amplification functions determined more directly applicable for earthquake engineering applications, such as PSV (pseudospectral velocity) and intensity. This will allow us to predict ground motion in Izmir for a possible big earthquake and be useful for planning hazard mitigation and urban development studies for the future earthquakes close to the city.

Finally, we give some indications on the evolution and the future prospect for our seismic network. In the near future, DEUNET will be developed by the number of the station and merged data from our stations and other permanent national stations to obtain more accurate seismic activities and produce detailed models of crustal and mantle structures in this area. These will increase the performance of the network, improve the data quality, reduce the processing time, and help us in our development of an early warning system for Izmir. It has also been continued to determine more focal mechanisms of

earthquakes of such a low magnitude that it would have been improbable to calculate it without this local network. Also, it can be concluded that the DEUNET will have an important place in helping the authorities to reduce earthquake risk in Izmir.

#### Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need for an ethics committee approval in the current article.

There is no conflict of interest with any person/institution in the current article.

#### Acknowledgment

Most of the figures were generated by using the GMT software package [25]. This study is supported by the Scientific Research Project of the Dokuz Eylül University (DEU- BAP 2018.KB.FEN.008). We are grateful to Suleyman Tunc who is a manager of the Sentez Engineering for his kind support.

#### Author Contribution Statement

All authors are project researchers (DEU- BAP 2018.KB.FEN.008) who contributed to the paper equally to this manuscript, and they have accepted responsibility for the entire content of this manuscript and approved its submission.

#### References

- [1] Sengor, A., Gorur, N., Saroglu, F. 1985. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as case study. In: Bittle KT, Christe-Blick N (ed) Strike slip formation and sedimentation, Soc. Economic Paleontologist and Mineralogists Special Publication , 37 pp 227-265.
- [2] Taymaz, T., Jackson, J., McKenzie, D. 1991. Active tectonics of the north and central Aegean Sea, *Geophysical Journal International*, 106: 433-490.
- [3] McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., et al. 2000. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus, *Journal of Geophysical Research*, 105:5695-5720.
- [4] Aktuğ, B., & Kiliçoğlu, A. 2006. Recent crustal deformation of İzmir, western Anatolia and surrounding regions as deduced from repeated GPS measurements and strain field, *Journal of Geodynamics*, 41:471-484.
- [5] Sozibilir, H., Sümer, Ö., Uzel, B., Ersoy, Y., Erkül, F., İnci, U., Helvacı, C., Özkaymak, Ç. 2009. The seismic geomorphology of the Sığacık Gulf (İzmir) earthquakes of October 17 to 20, 2005 and their relationships with the stress field of their western Anatolian region, *Geological Bulletin of Turkey*, 52:217-238.
- [6] Papadimitriou, E., E., & Sykes, L.R. 2001. Evolution of the stress field in the Northern Aegean Sea (Greece). *Geophysical Journal International*, 146:747-759.
- [7] Karakostas, V., G., Papadimitriou, E., E., Karakaisis, G., F., Papazachos, C., B., Scordilis, E., M., Vargemezis, G., Aidona, E. 2003. The 2001 Skyros, Northern Aegean, Greece, earthquake sequence: off-fault aftershocks, tectonic implications, and seismicity triggering, *Geophys. Res. Lett.*, 30. <https://doi.org/10.1029/2002GL15814>.
- [8] Tan, O., Papadimitriou, E., E., Pabuçcu, Z., Karakostas, V., Yörük, A., Leptokaropoulos, K. 2014. A detailed analysis of microseismicity in Samos and Kusadasi (Eastern Aegean Sea) areas, *Acta Geophys*, 62:1283-1309. <https://doi.org/10.2478/s11600-013-0194-1>.
- [9] Becker, T. W., and C. Faccenna 2011. Mantle conveyor beneath the Tethyan collisional belt, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 310(3), 453-461.
- [10] Shaw, B. and Jackson, J. 2010. Earthquake mechanisms and active tectonics of the Hellenic subduction zone. *Geophysical Journal International*, 181: 966-984.
- [11] Paradisopoulou et al. 2010. Paradisopoulou, P.M., Papadimitriou, E.E., Karakostas, V.G. et al. 2010. Seismic Hazard Evaluation in Western Turkey as Revealed by Stress Transfer and Time-dependent Probability Calculations. *Pure Appl. Geophys.* 167(8-9), 1013-1048.
- [12] Sayil, N. 2013. Long-term earthquake prediction in western Anatolia with the time- and magnitude-predictable model. , 66(2), 809-834.
- [13] Papazachos, B.C., Karakaisis, G.F., Scordilis, E.M. 2014. Time dependent seismicity in the continental fracture system. *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata* 55: 617-639.
- [14] Chorozoglou, D., Papadimitriou, E. 2019. Monitoring earthquake network measures between main shocks in Greece. *J Seismol* 23, 505-519 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09820-7>.
- [15] Coban, K.H., Sayil, N. 2019. Evaluation of earthquake recurrences with different distribution models in western Anatolia. *J Seismol* 23, 1405-1422. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09876-5>.
- [16] Eyidogan, H. 1988. Rates of crustal deformation in western Turkey as deduced from major earthquakes. *Tectonophysics*, 148:83-92.
- [17] Polat, O., Gok, E., & Yılmaz, D. 2008. Earthquake hazard of Aegean Extension Region, Turkey, *Turkish Journal of Earth Science*, 17:593-614.
- [18] Gok, E., & Polat, O. 2014. An assessment of the microseismic activity and focal mechanisms of the İzmir (Smyrna) area from a new local network, IzmirNET, *Tectonophysics*, 635:154-164.
- [19] Emre, O., Duman, T.Y., Ozalp, S., Elmacı, H., Olgun, S., & Saroglu, F. 2013. The Directorate General of Mineral Research and Exploration (MTA). 1:250 000 scale active fault map of Turkey series, Ankara, Türkiye.
- [20] AFAD, 2020. Turkish Ministry of Interior Disaster and Emergency Management Presidency. Samos earthquake. <https://deprem.afad.gov.tr/>
- [21] Bozkurt, E. 2003. Origin of NE-trending basins in western Turkey, *Geodinamica Acta*, 16, 61-81.
- [22] Havskov, J., Voss, P., H., Ottemöller, L. 2020. Seismological observatory software: 30 yr of SEISAN, *Seismological Research Letters*, 91:1846-1852. <https://doi.org/10.1785/0220190313>.
- [23] Helmholtz-Centre Potsdam - GFZ German Research Centre for Geosciences and gempa GmbH, The SeisComP seismological software package, GFZ Data Services, 2008, <https://doi.org/10.5880/GFZ.2.4.2020.003>.
- [24] Snoke, J., A., Munsey, J., W., Teague, A.G., Bollinger, G., A. 1984. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data. *Earthq., Notes* 55.
- [25] Wessel, P., Smith, W., H., F., Scharroo, R., Luis, J., and Wobbe, F. 2018. Generic Mapping Tools: Improved Version Released, *EOS Transactions American Geophysical Union*, 94(45): 409-410.
- [26] Farr, T., G., Rosen, P., A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., et al. 2007. The Shuttle Radar Topography Mission, *Reviews of Geophysics* , 45(2), 19-20.
- [27] National Geophysical Data Center, Two-minute gridded global relief data (ETOPO2) v2, National Centers for Environmental Information 2006. [https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ngdc.mgg.dem:301.Lermo, J., Chavez-Garcia, F.J., 1993. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. Bull. Seism. Soc. Am. 83 \(5\), 1574-1594.](https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ngdc.mgg.dem:301.Lermo, J., Chavez-Garcia, F.J., 1993. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. Bull. Seism. Soc. Am. 83 (5), 1574-1594.)
- [28] Styron, R., Pagani, M. 2020. The GEM Global Active Faults Database, *Earthquake Spectra*, 36, 1, pp. 160-180, doi:10.1177/8755293020944182.
- [29] Lermo, J., Chavez-Garcia, F.J., 1993. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bull. Seism. Soc. Am.* 83 (5), 1574-1594.
- [30] Özer, Ç. ve Polat, O. 2017. İzmir ve Çevresinin 1-B Sismik Hız Yapısının Belirlenmesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* , 19 (55) , 147-168.



## Farklı Uzaklık Fonksiyonlarının Spektral Kümeleme Algoritmasının Performansına Etkisi

### Effect of Different Distance Measures on the Performance of Spectral Clustering Algorithm

Gülay İlonca Telsiz Kayaoğlu<sup>1\*</sup>, Mustafa Eroğlu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Matematik Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Matematik Anabilim Dalı, İstanbul, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: gulay.telsiz@msgsu.edu.tr

#### Öz

Makine öğrenmesinin bir kolu olan denetimsiz öğrenme problemlerinde kullanılan kümeleme algoritmaları, veri noktalarını benzer özelliklere sahip olan gruplara ayırmak için veri noktaları arasındaki uzaklıkları ölçen bir uzaklık fonksiyonu kullanır, ve bu, standart durumda Öklid uzaklığıdır. Bununla birlikte en sık kullanılan kümeleme algoritmalarından k-ortalama (k-means) kümeleme algoritmasında Öklid uzaklığı yerine farklı uzaklık fonksiyonları kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırıldığı [1],[2] gibi çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada ise Spektral kümeleme algoritması farklı uzaklık fonksiyonları ile ele alınarak sonuçlar değerlendirilmiştir. K-ortalama algoritmasının başarılı şekilde ayıramadığı veri kümeleri tercih edilmiş ve spektral kümeleme algoritmasında Öklid uzaklığının yanı sıra farklı uzaklık fonksiyonları da kullanarak daha iyi bir kümeleme yapılabileceği incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Denetimsiz Öğrenme, Spektral Kümeleme, Uzaklık Fonksiyonları

#### Abstract

Clustering algorithms used in unsupervised learning problems, which is a branch of machine learning, use a distance function that measures the distances between data points to separate data points into groups with similar characteristics, and this is known as the Euclidean distance in the standard case. However, there are studies such as [1] and [2] in which the results obtained by using different distance functions instead of Euclidean distance in the K-means clustering algorithm, which is one of the most frequently used clustering algorithms, are compared. In this study, the Spectral clustering algorithm is handled with different distance functions and its results are evaluated. The datasets that the k-means algorithm could not separate successfully were preferred and it was examined whether a better clustering could be made by using different distance functions in addition to the Euclidean distance in the spectral clustering algorithm.

**Keywords:** Unsupervised Learning, Spectral Clustering, Distance Functions

#### EXTENDED ABSTRACT

##### Introduction

Spectral Clustering is a method used to categorize points with similar characteristics on a graph. This technique relies on mathematical concepts such as graph theory and linear algebra to sort points based on their proximity relationships in the graph.

The Spectral clustering method utilizes a Laplacian operator to determine the positions of points in a graph. This operator examines relationships among points and represents them as a matrix. Subsequently, the eigenvectors corresponding to the smallest eigenvalues of this matrix are calculated, and these eigenvectors are employed to partition the points in the graph into groups with similar characteristics.

##### Materials and Methods

In this study, the impact of different distance functions on Spectral Clustering is explored by considering three different

Spectral Clustering algorithms and six different distance functions.

##### Spectral Clustering Algorithms:

Three algorithms were employed: the unnormalized Spectral Clustering Algorithm, "Shi & Malik's" normalized Spectral Clustering algorithm, and "Ng, Jordan & Weiss's" normalized Spectral Clustering algorithm. The difference between these algorithms lies in the Laplacian matrices used. The Laplacian matrices used in these algorithms are given as follows:

$$L = D - W \quad (1)$$

$$L_{rw} = D^{-1}L = I - D^{-1}W \quad (2)$$

$$L_{sym} = D^{-1/2}LD^{-1/2} \quad (3)$$

The steps of the algorithms to be used are as follows [3]:

Input: Similarity matrix  $S \in \mathbb{R}^{n \times n}$ , number  $k$  of clusters to construct.

- Step 1. Construct a similarity graph
- Step 2. Compute the Laplacian matrix
- Step 3. Compute the first  $k$  eigenvectors  $u_1, u_2, \dots, u_k$  (the eigenvectors corresponding to the smallest  $k$  eigenvalues).
- Step 4. Let  $U$  be the matrix containing the vectors  $u_1, u_2, \dots, u_k$  as columns.
- Step 5. For  $i = 1, \dots, n$  let  $y_i \in \mathbb{R}^k$  be the vector corresponding to the  $i$ -th row of  $U$ . Cluster the points  $(y_i)_{i=1, \dots, n}$  with the  $k$ -means algorithm into clusters  $C_1, C_2, \dots, C_k$

Output: Clusters  $A_1, \dots, A_k$  with  $A_i = \{j \mid y_j \in C_i\}$

Distance Functions:

The study employs six different distance functions: Euclidean Distance, Manhattan Distance (Cityblock), Chebyshev Distance, Canberra Distance, Cosine Distance, Bray-Curtis Distance.

**Results**

Six distinct distance functions, as defined in section 2.2, are employed to assess clustering performance. The "Silhouette

score," rooted in [4], evaluates the adequacy of clustered data within clusters, with a score ranging from -1 to +1.

A score close to 1 signifies well-clustered data. Results reveal that the Canberra distance function produced the lowest score across all three datasets, while the Manhattan (Cityblock) distance function consistently achieved the highest clustering success.

**Conclusion**

This study explores the consequences of employing different distance functions, departing from the standard Euclidean metric in spectral clustering, on clustering across three datasets and six distance functions. While the Canberra distance function resulted in the lowest score, the Manhattan (Cityblock) distance function consistently achieved the highest clustering success.

To provide a more comprehensive perspective, expanding the comparison to include additional distance functions and datasets is recommended. Furthermore, a detailed exploration into the theoretical reasons behind the superior or inferior performance of various distance functions would significantly contribute to advancing this field.

**1. Giriş**

Spektral kümeleme, bir grafikteki noktaları benzer özelliklere sahip gruplara ayırmak için kullanılan bir yöntemdir.

Bu yöntem, grafikteki noktaların komşuluk ilişkilerine göre gruplandırılmasını sağlar ve bu gruplara ayırma işlemini gerçekleştirilirken, graf teorisi ve lineer cebir gibi matematiksel kavramları kullanılır.

Spektral kümeleme yöntemi, grafikteki noktaların konumlarını belirlemek için bir Laplasyen operatörü kullanır. Bu operatör, noktalar arasındaki ilişkileri inceler ve bunları bir matris olarak gösterir. Daha sonra, bu matrisin en küçük özdeğerlerine karşılık gelen özvektörler hesaplanır ve bu özvektörler, graftaki noktaları benzer özellikleri olan gruplara ayırmak için kullanılır.

**2. Materyal ve Metot**

Bu çalışmada farklı uzaklık fonksiyonlarının spektral kümelemeye etkisi incelenirken üç farklı spektral kümeleme algoritması ve 6 farklı uzaklık fonksiyonu ele alınmıştır.

**2.1. Spektral Kümeleme Algoritmaları**

Bu üç veri kümesi ve farklı uzaklık fonksiyonları kullanılarak, "Normalize Edilmemiş Spektral Kümeleme Algoritması" ile "Shi & Malik'in" ve "Ng, Jordan & Weiss'in" normalize edilmiş spektral kümeleme algoritmaları olmak üzere üç farklı algoritma ile kümelenecek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu algoritmalar arasındaki fark kullanılan Laplasyen matrislerin farklı olmasıdır. Bu algoritmalarda kullanılan Laplasyen matrisler sırasıyla aşağıda verilmiştir;

$$L = D - W \tag{1}$$

$$L_{rw} = D^{-1}L = I - D^{-1}W \tag{2}$$

$$L_{sym} = D^{-1/2}LD^{-1/2} \tag{3}$$

Burada  $W$  ağırlık matrisi,  $D$  derece matrisidir.

Kullanılacak algoritmaların adımları ise şu şekildedir [3]:

Girdi:  $S \in \mathbb{R}^{n \times n}$  benzerlik matrisi,  $k$  küme sayısı olsun.

- 1. Adım: Benzerlik grafını oluşturma

- 2. Adım: Laplasyen matrisini hesaplama
- 3. Adım: Laplasyen matrisin en küçük ilk  $k$  özdeğerine karşılık gelen  $u_1, u_2, \dots, u_k$  özvektörlerini hesaplama
- 4. Adım: Sütunları  $u_1, \dots, u_k$  olan  $U \in \mathbb{R}^{n \times k}$  matrisini oluşturma.
- 5. Adım:  $i = 1, \dots, n$  için  $y_i \in \mathbb{R}^k$ ,  $U$  matrisinin  $i$ .satura denk gelen vektör olsun.  $K$ -ortalamalar ile  $(y_i)_{i=1, \dots, n}$  noktalarını  $C_1, C_2, \dots, C_k$  biçiminde kümeleme.

Çıktı:  $A_1, \dots, A_k$  kümeleri öyle ki  $A_i = \{j \mid y_j \in C_i\}$

**2.2. Uzaklık Fonksiyonları**

Çalışmada kullanılan 6 farklı uzaklık fonksiyonu aşağıda verilmiştir:

$x, y \in \mathbb{R}^n$  için Öklid (Euclidean) uzaklığı:

$$d_2(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \tag{4}$$

$x, y \in \mathbb{R}^n$  için Manhattan uzaklığı (Cityblock):

$$d_1(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \tag{5}$$

$x, y \in \mathbb{R}^n$  için Chebyshev Uzaklığı:

$$d_\infty(x, y) = \max_i |x_i - y_i| \tag{6}$$

$x, y \in \mathbb{R}^n$  için Canberra uzaklığı:

$$d_{can}(x, y) = \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{|x_i| + |y_i|} \tag{7}$$

$x, y \in \mathbb{R}^n$  için Cosine uzaklığı:

$$d_{cos}(x, y) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \tag{8}$$

$x, y \in \mathbb{R}^n$  için Bray-Curtis uzaklığı:

$$d_{bray}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{\sum_{i=1}^n (x_i + y_i)} \tag{9}$$

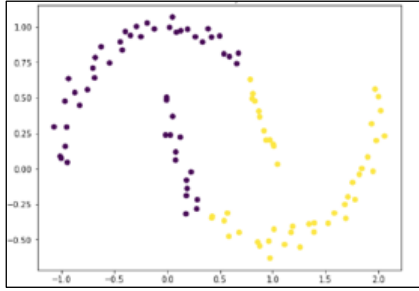


### 3. Bulgular

Bu kısımda üç veri kümesi 2.1.'de açıklanan üç Laplasyen matris ( $L, L_{sym}, L_{rw}$ ) kullanılarak spektral kümeleme algoritması ile kümelendirken 2.2.'de tanımlanmış olan 6 farklı uzaklık fonksiyonu kullanılmıştır. Kümeleme başarısını ölçmek için, kümelenen verilerin bulunduğu kümedeki uygunluğunu bulmak için geliştirilen ve temeli [4] makalesine dayanan "Silhoutte skoru" kullanılmıştır. Bu değer, -1 ile +1 arasında değişmekte olup değerinin 1'e yakın olması verilerin iyi kümelendiğini gösterir.

#### 3.1. Noisy Moons Veri Kümesi:

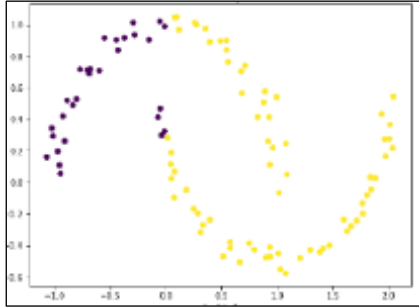
Bu veri kümesi iç içe iki ay şekliyle oluşmaktadır. K-means algoritması bu kümeyi aşağıdaki gibi kümelemektedir:



**Şekil 1.** Noisy moons veri kümesinin k-means ile kümelendiği (Silhoutte skoru: 0.481737)

**Figure 1.** Clustering of noisy moons dataset with k-means (Silhoutte score: 0.481737)

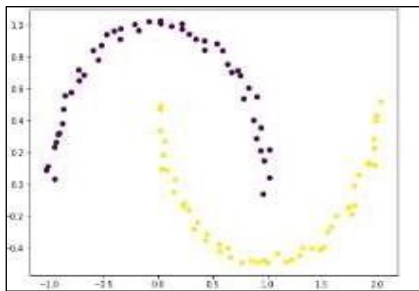
Bu veri kümesi için en kötü sonucu veren kombinasyon Canberra - L kombinasyonu olmuştur;



**Şekil 2.** Noisy moons veri kümesi için Canberra - L kombinasyonu (Silhoutte skoru: 0.81479)

**Figure 2.** Canberra - L combination for the noisy moons dataset (Silhoutte score: 0.81479)

En iyi sonucu veren kombinasyon ise Cityblock -  $L_{sym}$  kombinasyonu olmuştur:

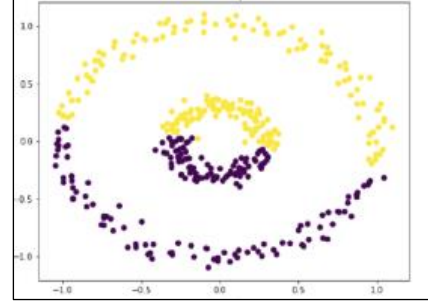


**Şekil 3.** Noisy moons veri kümesi için Cityblock -  $L_{sym}$  kombinasyonu (Silhoutte skoru: 0.99999)

**Figure 3.** Cityblock -  $L_{sym}$  combination for the noisy moons dataset (Silhoutte score: 0.99999)

#### 3.2. İç İçe Çember Veri Kümesi:

İç içe iki çemberden oluşan bu veri setini k-means algoritması aşağıdaki gibi kümelemektedir:



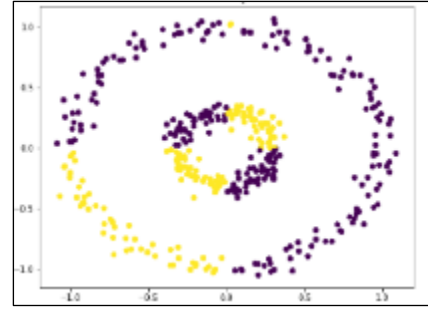
**Şekil 4.** İç içe çemberler veri kümesinin k-means ile kümelendiği (Silhoutte skoru: 0.291660)

**Figure 4.** K-means result on the nested circles dataset (Silhoutte score: 0.291660)

Görüldüğü gibi k-means ile kümeleme yapıldığında iki çember iki ayrı küme olarak kümelendiği görülmüştür.

Spektral kümeleme kullanıldığında ise aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

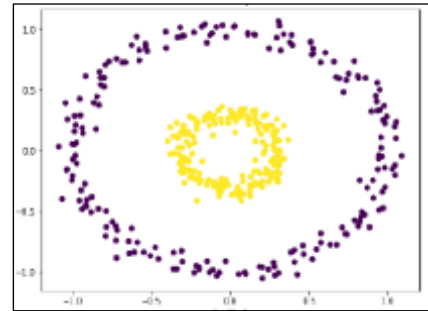
En kötü sonucu veren kombinasyon Canberra -  $L_{rw}$  kombinasyonu olmuştur;



**Şekil 5.** İç içe çemberler veri kümesi için Canberra -  $L_{rw}$  kombinasyonu (Silhoutte skoru: 0.658868)

**Figure 5.** Canberra -  $L_{rw}$  combination for the dataset of nested circles (Silhoutte score: 0.658868)

En iyi sonucu veren kombinasyon ise Cityblock -  $L_{rw}$  kombinasyonu olmuştur:

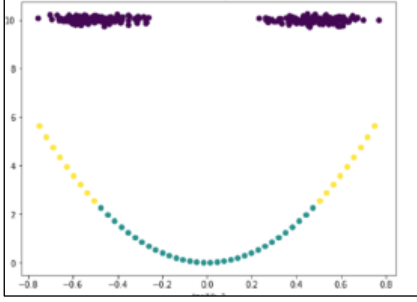


**Şekil 6.** İç içe çemberler veri kümesi için Cityblock -  $L_{rw}$  kombinasyonu (Silhoutte skoru: 0.99999)

**Figure 6.** Cityblock -  $L_{rw}$  combination for the dataset of nested circles (Silhoutte score: 0.99999)

### 3.3. Gülen Yüz Veri Kümesi:

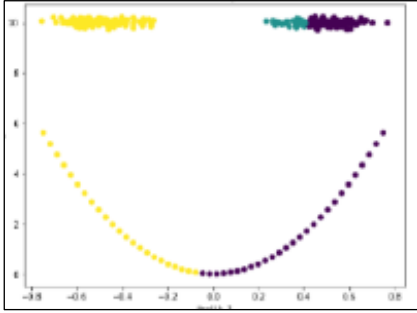
Bu veri kümesini k-means algoritması aşağıdaki gibi kümelemektedir:



**Şekil 7.** Gülen yüz veri kümesinin k-means ile kümelmesi (Silhouette skoru: 0.8605798)

**Figure 7.** Clustering of smiley face dataset with k-means (Silhouette score: 0.8605798)

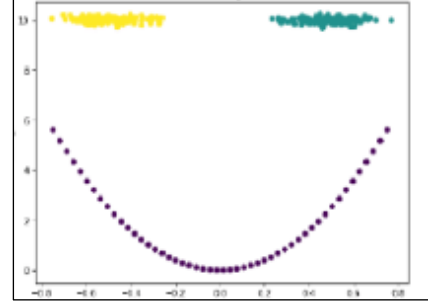
Bu veri kümesi için en kötü sonucu veren kombinasyon Canberra -  $L_{sym}$  kombinasyonu olmuştur;



**Şekil 8.** Gülen yüz veri kümesi için Canberra -  $L_{sym}$  kombinasyonu (Silhouette skoru: 0.7969235)

**Figure 8.** Canberra -  $L_{sym}$  combination for the smiley face dataset (Silhouette score: 0.7969235)

En iyi sonucu veren kombinasyon ise Cityblock -  $L_{rw}$  kombinasyonu olmuştur:



**Şekil 9.** Gülen yüz kümesi için Cityblock -  $L_{rw}$  kombinasyonu (Silhouette skoru: 1.0)

**Figure 9.** Cityblock -  $L_{rw}$  combination for smiley face dataset (Silhouette score: 1.0)

Sonuç olarak spektral kümeleme algoritması kullanılarak yapılan kümelemede Canberra uzaklık fonksiyonu üç veri kümesinde de en kötü skoru vermiş, Manhattan (Cityblock) uzaklık fonksiyonu ise üç veri kümesinde de en iyi kümeleme başarısına ulaşmıştır.

Bu üç veri setinin üç Laplasien matrisi ve 6 uzaklık fonksiyonu kullanılarak kümelmesi sonucunda elde edilen kümelmiş verinin Silhouette skorları toplu olarak aşağıdaki tablolarda verilmiştir:

**Tablo 1.** Noisy moons veri kümesi için elde edilen sonuçlar (Silhouette skorları)

**Table 1.** Results obtained for the noisy moons dataset (Silhouette scores)

Uzaklık Fonksiyonu	$L$	$L_{sym}$	$L_{rw}$
Bray Curtis	0.9831515545901125	0.9663808194002818	0.9831515545902012
Canberra	0.8147888416594591	0.8262316211390218	0.8315216020471056
Chebyshev	0.9783271990057654	0.980107386167194	0.9783271990057086
Cityblock	0.9756451258744877	0.9999999999999978	0.9756451258744733
Cosine	0.9589796777387939	0.9498972746091934	0.9155276577911508
Euclidean	0.999999971441901	0.999999964387821	0.999999974217948

**Tablo 2.** İç içe çemberler veri kümesi için elde edilen sonuçlar (Silhouette skorları)

**Table 2.** Results obtained for the nested circles dataset (Silhouette scores)

Uzaklık Fonksiyonu	$L$	$L_{sym}$	$L_{rw}$
Bray Curtis	0.999999999999009	0.8384318920094864	0.999999999999247
Canberra	0.6887746900032858	0.6712992342698152	0.6588678674039116
Chebyshev	0.999999999999787	0.999999999904378	0.999999999999604

Cityblock	0.999999999999719	0.999999999999792	0.999999999999989
Cosine	0.997592801363221	0.9774739853603731	0.9822451540571193
Euclidean	0.9999999964142926	0.9999999977729033	0.9999999963393109

**Tablo 3.** Gülen yüz veri kümesi için elde edilen sonuçlar (Silhoutte skorları)

**Table 3.** Results obtained for the smiley face dataset (Silhoutte scores)

Uzaklık Fonksiyonu	$L$	$L_{sym}$	$L_{rw}$
Bray Curtis	0.999999999999711	0.999999999999964	0.999999999999972
Canberra	0.8031440281569725	0.7969235362610836	0.8081768659048145
Chebyshev	0.999999999999962	0.999999999999966	0.999999999999974
Cityblock	0.999999999999987	0.999999999999964	1.0
Cosine	0.9914484450993188	0.9901801064498377	0.9901801064498377
Euclidean	0.9999999984402748	0.9999999976211893	0.9999999975880882

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada spektral kümelemede standart olarak kullanılan Öklid metriği yerine farklı uzaklık fonksiyonlarının alınmasının kümelemeyi nasıl etkilediği üç veri seti ve 6 uzaklık fonksiyonu üzerinden incelenmiştir.

Canberra uzaklık fonksiyonu üç veri kümesinde de en kötü skoru vermiş, Manhattan (Cityblock) uzaklık fonksiyonu ise üç veri kümesinde de en iyi kümeleme başarısına ulaşmıştır.

Karşılaştırılan uzaklık fonksiyonlarının ve veri setlerinin sayısı artırılarak daha iyi bir bakış açısı kazanılabilecektir. Farklı uzaklık fonksiyonlarının neden daha iyi ya da daha kötü sonuç verdiğinin teorik olarak açıklanması ise bu alana büyük katkı sağlayacaktır.

#### Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Yazar katkılarının beyanı

Bu çalışma birinci yazarın danışmanlığındaki ikinci yazarın "Spektral Kümeleme ve Farklı Uzaklık Fonksiyonlarının Spektral Kümelemeye Etkisinin İncelenmesi" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Fikir oluşturma ve teorik alt yapının kurulmasında 1. yazar, Python ile analizlerin gerçekleştirilmesi ise 2. yazar tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda yazarlar çalışmaya farklı yönlerden eşit oranda katkı sağlamışlardır.

#### Kaynaklar

- [1] Singh, A., Yadav, A., Rana, A., 2013. K-means with Three different Distance Metrics, International Journal of Comp. Applications, Cilt. 67(10), s.13-17. DOI:10.5120/11430-6785
- [2] Ghazal, T.M. et al., 2021. Performances of K-Means Clustering Algorithm with Different Distance Metrics, Intelligent Automation & Soft Computing, Cilt. 30(2), s. 735-742. DOI:10.32604/iasc.2021.019067
- [3] von Luxburg, U., 2007, A Tutorial on Spectral Clustering, Statistics and Computing, Cilt. 17(4), s. 395-416. DOI:10.1007/s11222-007-9033-z
- [4] Rousseeuw, P.J. (1987) Silhouettes: A Graphical Aid to the Interpretation and Validation of Cluster Analysis, Comput. Appl. Math. Cilt. 20, s. 53-65. DOI:10.1016/0377-0427(87)90125-7



RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALESI

## TACO: An Ontology in Turkish for Identifying and Controlling Plant Pests, Weeds and Diseases

### TACO: Bitki Zararlıları, Yabani Otlar ve Hastalıkların Tespiti ve Kontrolü İçin Türkçe Bir Ontoloji

Övünç Öztürk 

Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Manisa, TÜRKİYE

Corresponding Author / Sorumlu Yazar\*: ovunc.ozturk@cbu.edu.tr

#### Abstract

While ensuring a more sustainable production, because of reduced chemical usage it is more complicated to control plant pests, diseases and weeds in smart agriculture. For this reason, it is of great importance to detect pests, diseases and weeds at the earliest stage. It is important that both farmers and the artificial intelligence applications developed for agricultural control should be able to detect these organisms and to know the agricultural control methods. Semantic technologies and ontologies provide machine interpretable information and solutions for heterogeneity. This study presents the Turkish Agricultural Control Ontology (TACO), which is built in Turkish and contains information about plant pests, diseases and weeds common in Turkey. The contributions of the study are that it is the first Turkish ontology built in this field and that the methods of agricultural control are included within the scope of the ontology. According to the commonly used ontology evaluation metrics, TACO is predominantly characterized as a deep classification taxonomy. In addition, it was concluded that the classes in the ontology have an evenly distributed and sufficient number of class individuals.

**Keywords:** ontology, artificial intelligence, agricultural control, plant pests, plant diseases, weeds

#### Öz

Akıllı tarımda daha sürdürülebilir bir üretim sağlanırken, kimyasal kullanımının azalması nedeniyle bitki zararlıları, hastalıkları ve yabancı ot kontrolü daha karmaşık hale gelmektedir. Bu nedenle zararlı, hastalık ve yabancı otların erken aşamada tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır. Hem çiftçilerin hem de tarımsal mücadele için geliştirilen yapay zeka uygulamalarının bu organizmaları tespit edebilmesi ve tarımsal mücadele yöntemlerini bilmesi önemlidir. Semantik teknolojiler ve ontolojiler, makine tarafından yorumlanabilir bilgiler ve heterojenlik için çözümler sağlar. Bu çalışmada Türkiye'de yaygın olarak görülen bitki zararlıları, hastalıkları ve yabancı otlar hakkında bilgiler içeren Türkçe olarak oluşturulmuş Türk Tarımsal Kontrol Ontolojisi (TACO) sunulmaktadır. Çalışmanın katkıları, bu alanda yapılan ilk Türk ontolojisi olması ve tarımsal mücadele yöntemlerinin ontoloji kapsamında yer almasıdır. Sıkça kullanılan ontoloji değerlendirme metriklerine göre TACO, ağırlıklı olarak derin bir sınıflandırma taksonomisi olarak nitelendirilmiştir. Ayrıca ontolojideki sınıfların eşit olarak dağılım gösteren, yeterli sayıda sınıf örneğine sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** ontoloji, yapay zeka, tarımsal kontrol, bitki zararlıları, bitki hastalıkları, yabancı otlar

#### 1. Introduction

Today, with the increasing world population, smart agriculture applications that increase productivity and reduce resource consumption is gaining attention. There are many ongoing studies in this field. This subject has also been studied intensively in Turkey recently [1]. Smart agriculture practices aim yield increase; reduced chemical usage; disease, pest and health status monitoring and automated agricultural production. One of the challenges in implementation of smart farming practices is to provide the necessary information needed by the applications.

There are huge amounts of heterogeneous, unstructured and non-machine interpretable data, which are presented to third parties in various formats. Ontologies and semantic technologies are useful tools to integrate and harmonize data from different sources.

A number of dictionaries and ontologies have been defined for different purposes for the agricultural community, most of which are hosted in the AgroPortal ontology repository [2]. Some important ontologies related to this work, both in the AgroPortal and in other sources, are listed below;

Plant Ontology (PO) [3]: An ontology collection developed by the Plant Ontology Consortium. These ontologies describes the anatomical structures, growth and development stages of the organisms in the Viridiplantae group. PO is designed for use in multiple applications, including genetics, genomics, phenomics, developmental biology, taxonomy and systematic studies, semantic applications and education.

Plant Trait Ontology (PTO) [4]: An ontology that describes phenotypic characters in plants. Each phenotypic character is a distinguishable feature, characteristic, quality or phenotypic characteristic of a developing or mature plant.

Plant Experimental Conditions Ontology (PECO) [5]: a structured, controlled vocabulary describing treatments, growing conditions, and/or types of studies used in plant biology experiments.

Plant Stress Ontology (PSO) [6]: describes the biotic and abiotic stresses that a plant may encounter.

IDOPlant Ontology [7]: an ontology of infectious plant diseases.

Agronomy Ontology [8]: provides terms from the agronomy domain that are semantically organized and can facilitate the collection, storage and use of agronomic data.

AGROVOC [9]: a Linked Open Data Set about agricultural concepts, terms, definitions and relationships.

CropPestO [10]: an ontology covering crops, related pests and diseases, their associated symptoms, and suggested control methods. The ontology has been built in English and labelled in Spanish.

Ontology of Crop Pest Control [11]: defines a general model of crop pest control that contains related datasets on crops, pests and pest control measures.

Plant-Pathogen Interactions Ontology (PPIO) [12]: an ontology describing plant-pathogen interactions.

Pests in Crops and their Treatments Ontology (PCT-O) [13]: an ontology developed to explain the relationship between crops, pests and treatments. It contains 462 products, 549 pests and 42397 treatments.

PestOn [14]: an ontology for the domain of pesticide products so that their characteristics and features can be easily accessed, interoperable, and jointly usable by food system stakeholders.

The ontology in this study presents crops, associated pests (insects, diseases, weeds, nematodes, and mammals) and pest

management. Table 1 compares ontologies in the agricultural field. IDOPlant, Agrovoc, PCT-O, CropPestO and Ontology of Crop Pest Control are ontologies that describe plant pests. However, the gaps of these ontologies can be listed as follows:

- None of these ontologies includes information about weeds.
- There is no Turkish language support other than Agrovoc.
- They contain no or very limited information on crop pest control, other than PCT-O or Crop Pest Control Ontology.

The ontology that is closest to the presented ontology is Crop-Pest Ontology [10]. However, Crop-Pest Ontology does not provide Turkish language support. TACO has been defined in Turkish Language and contains information about diseases, pests, weeds especially seen in Turkey. Another similar and comprehensive study is the AGROVOC dictionary [9]. AGROVOC offers Turkish support. However, TACO also includes pest control methods. TACO also has a richer pesticide and weed content and the Turkish equivalents of the terms are based on expert opinions. However, in the tables and figures in the article, we used the English equivalents of the Turkish terms in the ontology to provide readability for non-Turkish readers of the article.

At this point, it would be appropriate to remind that the content of the ontology was created entirely by utilizing and adhering to the technical instructions published by the Turkish Ministry of Food, Agriculture and Livestock [15].

The next section describes the method followed and the materials used by this study. It contains the following subsections; ontology reuse, classes and class hierarchy, properties and instances. Section 3 presents the results and discussion. It contains the following two subsections: ontology statistics and experimental evaluation of the ontology. Finally, section four concludes the article with some useful recommendations.

**Table 1.** Comparison of ontologies for the agricultural community.

ontology	# entities	scope	language
PO	2018	plant anatomical entities, plant structure development stages	English
PTO	5260	phenotypic traits in plants	English
PECO	3119	treatments, growing conditions, and/or study types used in plant biology experiments	English
PSO	3762	major types of plant stress	English
IDOPlant	660	infectious plant diseases	English
Agronomy Ontology	3736	practices, techniques, and variables used in agronomic experiments	English
Agrovoc	41016	all areas of interest to FAO	42 languages
CropPestO	12404	plant pests and diseases	Spanish, English
Ontology of Crop Pest Control	1151	crop pest control	English
PPIO	2508	plant-pathogen interactions	English
PCT-O	43408	pests and suitable treatments	English
PestOn	16000	pesticide product information	English
TACO	1036	plant diseases, pests and weeds	Turkish

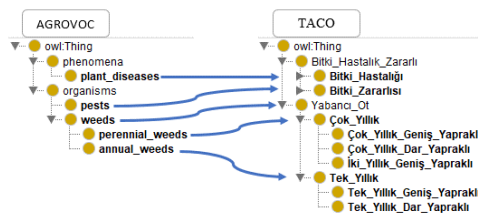
**2. Material and Method**

TACO ontology was built using OWL ontology language and Protégé Ontology Editor [16].

**2.1. Ontology Reuse**

It is planned to publish the TACO ontology in the Linked Open Data Cloud (LOD) [17] after obtaining the necessary permissions from TAGEM. In accordance with Linked Open Data standards, the terms in the TACO will be matched with those in AGROVOC, which is a standard vocabulary that provides information about organisms, plants and their products.

The matching process (Figure 1) is carried out by mapping the equivalent classes using "owl:equivalentClass" construct provided by the OWL ontology modeling language [18].



**Figure 1.** Mapping AGROVOC and TACO.

**2.2. Classes and Class Hierarchy**

To build the class hierarchy of the TACO ontology, first the common terms in the domain are listed. Then draft of the hierarchy is completed by adding concepts that are more specific. Figure 2 depicts the partial class hierarchy of TACO and the individual counts of the classes shown. The total count of the

classes in the ontology is 133 and there are 131 “subclassOf” relations between these classes.

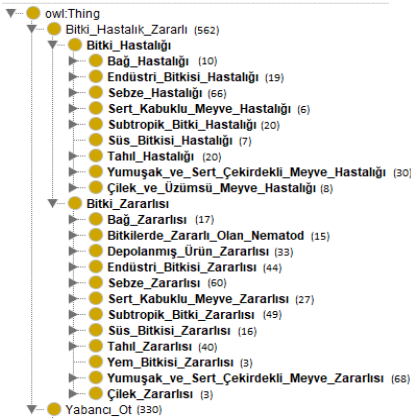


Figure 2. Partial hierarchy of TACO.

2.3. Properties

Table 2. Data properties defined in TACO.

owl:DataProperty	rdfs:domain	rdfs:range	#assertions
warfare	Plant_Disease_Pest U Weed	xsd:string	
biological_warfare	Plant_Disease_Pest U Weed	xsd:string	128
biotechnological_warfare	Plant_Disease_Pest U Weed	xsd:string	16
physical_warfare	Plant_Disease_Pest U Weed	xsd:string	21
physical_and_chemical_warfare_combination	Plant_Disease_Pest U Weed	xsd:string	6
quarantine_measure	Plant_Disease_Pest U Weed	xsd:string	41
chemical_warfare	Plant_Disease_Pest U Weed	xsd:string	570
conventional_warfare	Plant_Disease_Pest U Weed	xsd:string	1922
mechanical_warfare	Plant_Disease_Pest U Weed	xsd:string	70
scientific_name	Plant_Disease_Pest U Weed	xsd:string	893

3. Results

3.1. Ontology Metrics

The TACO ontology defines a total of 133 classes, 891 individuals and 7324 axioms. Figure 4 shows the statistical information of TACO obtained from the Protégé Ontology Editor.

Ontology metrics:	
<b>Metrics</b>	
Axiom	7324
Logical axiom count	5035
Declaration axioms count	1034
Class count	133
Object property count	0
Data property count	9
Individual count	891
Annotation Property count	3
<b>Class axioms</b>	
SubClassOf	131

Figure 4. The statistical information of TACO.

The data properties (between the classes and the literals) and the assertions of these properties are depicted in Table 2. There are 9 data properties and 3677 assertions of these properties in total.

2.4. Instances

891 individuals are defined in TACO. Figure 3 shows an example class individual and its attribute values. Table 3 depicts the individual examples of the some important classes in the ontology.

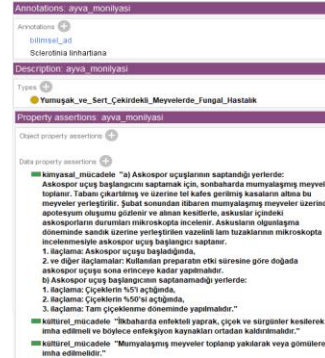


Figure 3. An example class individual.

3.2. Experimental Evaluation of the Ontology

In this section, TACO ontology is evaluated using the metrics from OntoQA framework [19], which is one of the most used ontology evaluation tools. QntoQA metrics are classified as schema and knowledge base metrics.

Within the scope of this study, relationship diversity (RD), attribute richness (AR) and schema deepness (SD) metrics from schema metrics and class utilization (CU), class connectivity (CC), class importance (CI), relationship utilization (RU), relationship importance (RI) and average population (AP) from knowledge base metrics are used.

Relationship Diversity (RD): shows the percentage ratio of rich relations between classes to all relations between classes. Rich relations are obtained by excluding hierarchical (subClassOf) relationships. The RD value for TACO was calculated as 0 because there are not any relationships between classes (except subClassOf) in TACO. Attribute Richness (AR): indicates the number of attributes per class. For TACO, this metric is calculated as 9/133 ≈ 0,067.



**Table 3.** Individuals defined in TACO.

Class	Examples of Instances
Vineyard_Disease	vineyard_anthraxnose, esca, vineyard_powdery_mildew, vineyard_downy_mildew...
Vineyard_Pest	vineyard_cicada, vineyard_thrips, vine_leafroller_tortrix, june_beetle...
Plant_Pest_Nematode	wheat_gall_nematode, dagger_nematode, potato_cyst_nematode...
Stored_Product_Pest	angoumois_grain_moth, mill_moth, khapra_beetle, flour_mite...
Industrial_Plant_Disease	cercospora_leaf_spot, late_leaf_spot...
Industrial_Plant_Pest	anise_moth, black_bean_aphid, pink_bollworm...
Vegetable_Disease	potato_late_blight_fungus, bean_rust...
Vegetable_Pest	artichoke_moth, carrot_fly, psychid_moth, colorado_potato_beetle...
Hard_Shelled_Fruit_Disease	leaf_spot_of_pistachio, almond_canker, walnut_anthraxnose...
Hard_Shelled_Fruit_Pest	twig_borer_moth, almond_seed_wasp, pear_blight_beetle, european_fruit_lectanium...
Subtropical_Plant_Disease	blue_mold_rot, citrus_storage_moulds...
Subtropical_Plant_Pest	cottony_cushion_scale, florida_wax_scale, olive_moth, cottony_camellia_scale...
Ornamental_Plant_Disease	begonia_mildew, rose_rust...
Ornamental_Plant_Pest	rose_shoot_sawfly, european_brown_scale...
Grain_Disease	stinking_smut, barley_smut, corn_smut, wheat_yellow_rust, rice_blast_disease...
Grain_Pest	european_rabbit, italian_tree_cricket, wheat_thrips, italian_locust, sunn_pest...
Feed_Crop_Pest	six_belted_clearwing, alfalfa_weevil...
Soft_and_Hard_Fruit_Disease	honey_fungus, quince_monilia, crown_gall...
Soft_and_Hard_Fruit_Pest	hawthorn_mite, brown_tail_moth, apple_rust_mite...
Berry_Fruit_Disease	raspberry_spur_blight, strawberry_powdery_mildew, common_spot_of_strawberry...
Strawberry_Pest	two_spotted_red_spider, carmine_spider_mite...
Weed	garden_vetch, clovegrass, cockspur, cornflower, johnsongrass, deathcap...

As the number of attributes per class increases, the quality of the modeled ontology also increases. A decrease in the number indicates that the number of attributes belonging to the classes is low and the classes are not extensively modeled.

**Schema Depth (SD):** shows the average number of subclasses per class. The SD value for TACO is calculated as  $131/133 \approx 0.984$ . The interpretation of the result is highly dependent on the structure of the ontology. While the schema depth is expected to be low in ontologies modeling a very specific field, the schema depth of the ontology generally increases as the modeled field expands.

**Class Usage (CU):** shows the number of instantiated classes divided by the number of all classes. The CU value for TACO is calculated as  $133/133=1$ .

**Class Connectivity (CC):** shows the total number of relationship instances of the class with other class instances. The CC values for TACO is 0 because there are not any relations between instances of classes.

**Class Importance (CI):** It shows the ratio of the number of samples belonging to the class and its subclasses to the total number of samples. The CI values for some classes in TACO were calculated as follows: Plant\_Disease ( $\approx 0,209$ ), Plant\_Pest ( $\approx 0,421$ ), Vineyard\_Disease ( $\approx 0,11$ ), Weed ( $\approx 0,37$ ), Subtropical\_Fruit\_Pest ( $\approx 0,055$ ), Grain\_Disease ( $\approx 0,22$ ). This metric, along with class connectivity, serves to understand the important classes in the ontology.

**Relationship Usage (RU):** shows the ratio of the number of relationships used by instances of a class to the number of

relationships defined for the class. The RU value is calculated as 1 for all classes in TACO. In other words, all relations defined for the class were used by the instances of the class. If the result is low, it means the relations are not used enough at the instance level. A higher value of this metric (closer to 1) means that relationships defined at the schema level are also used at the instance level.

**Relationship Importance (RI):** shows the ratio of the number of instances of a relationship to all relationship instances in the ontology. The RI values for relationships in TACO were calculated as follows:

biological_warfare	( $\approx 0,035$ ),
biotechnological_warfare	( $\approx 0,004$ ),
physical_warfare	( $\approx 0,006$ ),
physical_and_chemical_warfare_combination	( $\approx 0,002$ ),
quarantine_measure	( $\approx 0,011$ ),
chemical_warfare	( $\approx 0,155$ ),
conventional_warfare	( $\approx 0,523$ ),
mechanical_warfare	( $\approx 0,019$ ),
scientific_name	( $\approx 0,243$ ).

**Average Population (AP):** is obtained by dividing the number of class individuals in the knowledge base by the number of classes. This metric indicates whether the instance count is sufficient to represent all of the knowledge in the schema. The AP value for TACO was calculated as  $\approx 6,67$ .

These metrics were evaluated with the methodology presented in [20]. The percentage of the important metrics selected according to this methodology were scored as shown in Table 4. Table 5 shows the selected OntoQA metrics and their values for TACO (in percentage format).

According to the evaluation results, the RD value was calculated as 1. This result shows that "rich relationships" in ontology are

not modeled as comprehensively as “hierarchical relationships”. Considering that TACO is a biological classification taxonomy, this can be considered an expected result.

The SD value was calculated as 5. The result is high as expected. TACO models plant diseases, pests and weeds. This extensive domain knowledge results in the formation of a deep ontology taxonomy.

AR value was calculated as 1. This result indicates that the number of attributes per class is not high. Since ontology focuses

**Table 4.** Evaluation Scale of the Ontology Metrics.

Scale	1	2	3	4	5
Score	[0-20]%	[20-40]%	[40-60]%	[60-80]%	[80-100]%

**Table 5.** Scoring the metric values of TACO.

Metric	Value	Scale
RD	%0	1
SD	%98	5
AR	%7	1
CU	%100	5
Cl <sub>avg</sub>	%2	1

**4. Results and Discussion**

This article presents an ontology, namely TACO for plant diseases, pests and weeds, especially common in Turkey. Thus, a knowledge base that can be used in artificial intelligence-based smart agriculture applications has been built. TACO has been evaluated using OntoQA which is one of the most widely used ontology evaluation tools.

There is a need for the increase and development of smart computer solutions aiming disease, pest and weed control. In this sense, the contributions of the study to the research area can be summarized as follows:

- A fundamental study has been carried out on the increase of Turkish agricultural databases and their linking with other data sources,
- Studies on the compatibility and economic efficiency of the pesticides for disease, pest and weed control are gaining importance. The creation of relevant extensions of the presented ontology is critical for these studies,
- The ontology-based data will facilitate the integration of software systems on agribusiness with information in the field of disease, pest and weed control.

TACO is the first ontology on pest and weed control in Turkish. In addition to pest control, it provides information on weed control and provides a complementary study of agricultural control.

As a future work, it is planned to expand the TACO ontology according to the evaluation results. In addition, it is intended to extend the ontology with the images of class instances. Another future work is to make the ontology accessible on the LOD cloud via the REST API. It is also planned to add the multi-language support feature so that the widespread impact of the work will be increased.

**Ethics committee approval and conflict of interest statement**

This article does not require ethics committee approval.

This article has no conflicts of interest with any individual or institution.

**References**

on classes and class instances, this can be considered as an expected result.

The CU value was calculated as 5. This result states that all classes defined in the schema are used at the individual level. Finally, the average CI value of 1 indicates that all classes in the ontology have approximately equal importance. When the TACO ontology is examined, it will be seen that the distribution of class samples is roughly equal. This low average value of CI is due to the nature of the ontology.

[1] Tarım ve Orman Bakanlığı, 2019. Akıllı Tarım Platformu. <http://www.akillitarim.org/tr/> (Date Of Access: 22.02.2023)

[2] Jonquet, C., Toulet, A., Arnaud, E., Aubin, S., Yeumo, E.D., Emonet, V., Graybeal, J., Laporte, M.A., Musen, M.A., Pesce, V., Larmande, P. 2018. AgroPortal: A vocabulary and ontology repository for agronomy: Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 144, p. 126-143. DOI: 10.1016/j.compag.2017.10.012

[3] Jaiswal, P., Avraham, S., Ilic, K., Kellogg, E.A., McCouch, S., Pujar, A., Reiser, L., Rhee, S.Y., Sachs, M.M., Schaeffer, M., Stein, L., Stevens, P., Vincent, L., Ware, D., Zapata, F. 2005. Plant Ontology (PO): a Controlled Vocabulary of Plant Structures and Growth Stages: Comparative and Functional Genomics, Vol. 6(7-8), p. 388-397. DOI: 10.1002/cfg.496

[4] Arnaud, E., Cooper, L., Shrestha, R., Menda, N., Nelson, R.T., Matteis, L., Skofic, M., Bastow, R., Jaiswal, P., Mueller, L., McLaren, G. 2012. Towards a reference Plant Trait Ontology for modeling knowledge of plant traits and phenotypes. International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development, 4-7 October, Barcelona, 220-225.

[5] European Bioinformatics Institute, 2017. Plant Experimental Conditions Ontology. <https://biportal.bioontology.org/ontologies/PECO> (Date Of Access: 22.02.2023)

[6] European Bioinformatics Institute, 2020. Plant Stress Ontology. 2020. <https://biportal.bioontology.org/ontologies/PLANTSO> (Date Of Access: 22.02.2023)

[7] Walls, R.L., Smith, B., Elser, J., Goldfain, A., Stevenson, D.W., Jaiswal, P. 2012. A plant disease extension of the infectious disease ontology. International Conference on Biomedical Ontology, 21-25 July, Graz, 1-5.

[8] Aubert, C., Buttigieg, P.L., Laporte, M.A., Devare, M., Arnaud, E. 2017. Agronomy Ontology. <http://purl.obolibrary.org/obo/agro.owl> (Date Of Access: 22.02.2023)

[9] Caracciolo, C., Stellato, A., Morshed, A., Johannsen, G., Rajbahndari, S., Jaques, Y., Keizer J. 2013. The AGROVOC Linked Dataset: Semantic Web Journal, Vol. 4(3), p. 341-348. DOI: 10.5555/2786071.2786087

[10] Rodriguez-Garcia, M.A., Garcia-Sanchez, F. 2020. CropPestO: An Ontology Model for Identifying and Managing Plant Pests and Diseases: Communications in Computer and Information Science, Vol. 1309, p. 18-29. DOI: 10.1007/978-3-030-62015-8\_2

[11] Onkov, K. 2020. Ontology of Crop Pest Control. 3rd International Conference on Information Science and Systems, 19-22 March, Cambridge, 8-12.

[12] Iglesias, A.R., Aranguren, M. E., González, A.R., Wilkinson, M.D. 2013. Plant Pathogen Interactions Ontology (PPIO). International Work-Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 18-20 March, Gradana, 695-702.

[13] Lacasta, J., Lopez-Pellicer, F.J., Espejo-García, B., Noguera-Iso, J., Zarazaga-Soria, F.J. 2018. Agricultural recommendation system for crop protection: Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 152, p. 82-89. DOI: 10.1016/j.compag.2018.06.049

- [14] Medici, M., Dooley, D., Canavari, M. 2022. PestOn: An Ontology to Make Pesticides Information Easily Accessible and Interoperable: Sustainability, Vol. 14, p. 66-73. DOI: 10.3390/su14116673
- [15] TAGEM, 2018. Zirai Mücadele Teknik Talimatları Kitapları Cilt 1-Cilt 6. T.C. Tarım Orman ve Hayvancılık Bakanlığı, Ankara, 1841 p.
- [16] Noy, N., Ferguson, R., Musen, M. 2000. The knowledge model of Protégé-2000: combining interoperability and flexibility, 12th International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management, 2-6 October, French Riviera, 17-32.
- [17] Bizer, C., Vidal, M.E., Skaf-Molli, H. 2018. Linked Open Data. p 2096-2101. Liu, L., Özsu, M.T., ed. 2018. Encyclopedia of Database Systems, Springer Nature, Berlin, 4866 p.
- [18] Welty, C., McGuinness, D.L., Smith, M.K. 2004. OWL Web ontology language guide. <https://www.w3.org/TR/owl-guide/> (Date Of Access: 22.02.2023)
- [19] Tartir, S., Arpınar, I.B., Moore, M., Sheth, A.P., Aleman-Meza, B. 2005. OntoQA: Metric-based ontology quality analysis. IEEE Workshop on Knowledge Acquisition from Distributed, Autonomous, Semantically Heterogeneous Data and Knowledge Sources, 27 November, New Orleans, 45-53.
- [20] Ebietomer, E.P., Ekuobase, G.O. 2013. Evaluation of Ontology for Nigerian Case Laws: Computing, Information Systems, Development Informatics & Allied Research Journal, Vol. 4(3), p. 1-6.



RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALESİ

## An Experimental Investigation of Mechanical Behavior of HY 80 Steel in Corrosive Mediums

### HY 80 Çeliğinin Aşındırıcı Ortamlardaki Mekanik Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi

Buğra Yılmaz<sup>1</sup>, Ergin Kosa<sup>2\*</sup>, Şenol Durmuşoğlu<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> İstanbul Beykent Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

<sup>3</sup> Kocaeli Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Avrupa Meslek Yüksekokulu, Kocaeli, TÜRKİYE

Corresponding Author / Sorumlu Yazar\*: erginkosa@beykent.edu.tr

#### Abstract

In this study, mechanical behavior of HY 80 steel in various mediums such as solutions of HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaOH has been investigated experimentally. The plate specimens, tensile specimens and V-notched specimens are immersed in solutions of HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaOH. Mass losses of immersed HY 80 flat plate specimens are measured after 1 week, 2 weeks and 4 weeks for each H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaOH and HCl solutions to determine the aggressivity of the corrosive medium to surface of HY 80 steel. Also, tensile specimens and V-notched specimens are immersed for 1, 2 and 4 weeks to study on the effect of corrosive medium on fracture toughness and yielding behavior of HY 80 steels. The results show that however, yielding strength and ultimate tensile strength of HY 80 steel have reduced after immersed in acidic solutions of HCl and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, are stable after immersed in solution of NaOH. Furthermore, effect of acidic medium lower the fracture toughness of HY 80 steel.

**Keywords:** HY 80 steel, corrosion, fracture, yield strength, elongation, impact

#### Öz

Bu çalışmada, HY 80 çeliğinin, HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve NaOH çözeltileri gibi çeşitli ortamlardaki mekanik davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Plaka numuneleri, çekme numuneleri ve V çentikli numuneler, HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaOH çözeltilerine daldırılmıştır. HY 80 çeliğinin yüzeyinde korozif ortamın agresifliğini belirlemek için her bir H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaOH ve HCl çözeltileri için daldırılan HY 80 yassı levha numunelerinin kütle kayıpları 1 hafta, 2 hafta ve 4 hafta sonra ölçülmüştür. Ayrıca, çekme numuneleri ve V çentikli numuneler, korozif ortamın HY 80 çeliklerinin kırılma tokluğu ve akma davranışı üzerindeki etkisini incelemek için 1, 2 ve 4 hafta boyunca daldırılmıştır. Sonuçlar, HY 80 çeliğinin akma dayanımı ve nihai çekme dayanımı, HCl ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'ün asidik çözeltilerine daldırıldıktan sonra azaldığını göstermesine rağmen, NaOH çözeltisine daldırıldıktan sonra değişkenlik göstermemiştir. Ayrıca asidik ortamın etkisi HY 80 çeliğinin kırılma tokluğunu düşürmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** HY 80 çeliği, korozyon, kırılma, akma dayanımı, uzama, darbe

#### 1. Introduction

Corrosion is an electrochemical reaction causing to degrade material from the surface [1]. Corrosion phenomena is seen in many fields such as marine applications [2], industrial areas [3] and in environment [4, 5]. Corrosion is also formed in different types such as uniform [6] and pitting [5,7].

Tensile strength [8], yielding strength [9], crack propagation [10, 11, 12], fatigue life [13,14,15] are main mechanical properties that is affect by corrosion when the materials are exposed to aggressive mediums such as acidic [16] and saline [7, 17]. Corrosion effect on mechanical behavior of materials were studied experimentally [18] and/or numerically [19]. Also, materials work at operating conditions where both stress and corrosion are active [20, 21]. Many researches focused on the corrosion effect on mechanical character of materials such as steels [22], aluminum [23,24], copper alloys [25], zinc-magnesium alloys [4] and welded joints [26,27] at different mediums and conditions.

Rajput and Paik focused on 3 types of structural steels such as grade A mild steel, AH 32 steel and DH 32 steel. Tensile specimens were kept in seawater, freshwater and in the air at temperatures of 18° C, 0° C and -10° C during the 12 month-period. Yield strength and ultimate tensile strength of corroded specimens was not changed in dry and water-immersed solutions [28]. Rudomilova used dual phase steels to study the corrosion induced hydrogen effect with NaCl deposit in humid air. In the study, Rudomilova observed that dual phase steel demonstrated a reduction in properties of tensile strength and elongation because corrosion caused a decrease in cross-sectional area of the specimens and pitting was formed. On the other hand, Rudomilova demonstrated that hydrogen absorption for 27 days is inadequate to affect the mechanical properties [8]. Li et al. investigated corrosion effect on G250 mild steel used in bridge under stressed and non-stressed cases. The specimens are immersed in HCl solution having 2 different pH values such as 2.5 and 5, respectively. It is claimed that mass loss was drastically increased at stressed case for pH value of 2.5 and at stressed

DOI:10.21205/deufmd.2024267708

Atıf şekli / How to cite:

Yılmaz, B., Kosa, E., Durmuşoğlu, S. (2024). An Experimental Investigation of Mechanical Behavior of HY 80 Steel in Corrosive Mediums DEUFMD, 26(77), 248-254.

Geliş Tarihi / Received: 25.04.2023

Kabul Tarihi / Accepted: 21.08.2023



conditions there is a higher decrease in ultimate and yield strength of the steel than at non-stressed cases for both pH values in 28 day-tests [16]. Mishra analyzed the fatigue life of aluminum alloy 8011 after immersing in NaCl solutions having percentages of 3.5%, 4%, 4.5% and 5% for a week. Elongation of aluminum alloy 8011 is lowered from 16% to 10%. Failure occurred after  $1.2 \times 10^7$  cycles and  $6 \times 10^6$  cycles for uncorroded and corroded specimens for load of 4 kg and bending stress of 120.32MPa, respectively [29]. Garbatov et al. studied on box girder steel corroded in seawater. After a 20% degradation, corrosion effect becomes dominant on the mechanical character of the steel. It was found that there is nonlinear decrease in yield strength whereas linear decrease in tensile strength was observed [30]. Hamidah et al. used copper alloys in various solutions such as KOH, NaOH, NaCl and HCl to research corrosive effect of the mediums to mechanical properties. It was observed that increase in the concentration of electrolytes increases the corrosion rate. As the corrosion rate is lowered, the mean decrease in ultimate and yield strength lower for all solutions. It was also found that NaCl and HCl electrolytes are more dominant and effective on tensile strength and yield strength of copper rather than alkaline solutions [25].

HY-80 steel shows high strength, ductility, impact toughness [31]. Besides that, HY 80 has a great resistance in corrosive medium [32]. It is high strength steel to provide mechanical properties needed in many Navy fields, such as ship and submarine hulls [33]. Thus, the interested material in the work is chosen as HY-80

steel. The novelty of the study is that mechanical properties of HY 80 steel such as tensile strength, yielding strength, impact energy, fracture (rupture) elongation have not been investigated in corrosive mediums. HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaOH solutions have been prepared and the HY 80 steel specimens have been immersed in the solutions to determine the effect of aggressive mediums.

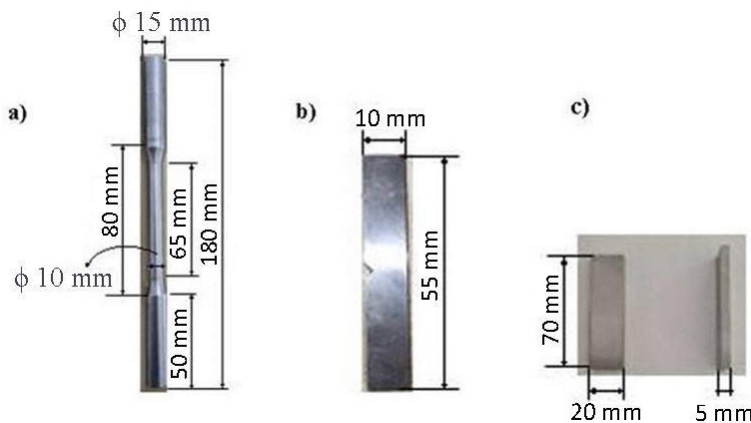
**2. Materials and Methods**

**2.1. Material and Chemical Composition**

HY 80 steel is a high yield steel and commonly used in fields of submarine. Chemical composition of HY 80 Steel is given table 1. As shown in Figure 1, Tensile and V-notched specimens are prepared according to TS EN ISO 6892-1 [34] and TS EN ISO 148-1 standards, respectively [35] and metal flat plates are manufactured to be used to measure the mass loss of HY 80 steel for 7, 14 and 28 days and all specimens immersed in alkaline and acidic solutions. For Charpy impact and tensile test, two V-notched specimen and tensile specimen were submerged for each period of 7, 14, 28 days and then, average of yield Charpy-impact test to compare the mechanical behavior for each medium in the strength value, ultimate tensile strength value, fracture elongation and fracture energy of specimens were found in tensile test and study. For mass loss calculations, three flat metals were used for 7,14 and 28 day-measurement in each solution. The tensile specimens were covered with two elastic resistant bands to avoid corrosion in solutions at regions where the grips of tensile test machine hold.

**Table 1.** Chemical Composition of HY 80 steel.

Element	C	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	P	Si	Ti	S	V
Content %	0.12-0.18	1.00-1.8	Max 0.25	0.10-0.40	0.20-0.60	2.00-3.25	Max 0.025	0.15-0.35	0.02	Max 0.025	0.03



**Figure 1.** a) Tensile test specimen, b) Charpy-impact test specimen, c) flat plate

**2.2. Solution Types and Preparation**

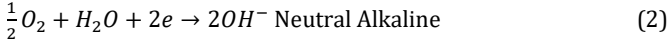
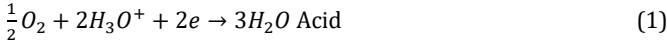
To understand the corrosion effect on mass loss, mechanical behavior of HY 80 steel, the steel specimens were kept in different aggressive mediums. In the experiments, three different solutions such as sulfuric acid, hydrochloric acid, sodium hydroxide were prepared at different percentages. pH values of solutions measured by pH meter were given in Table 2.

**Table 2.** pH values of solutions

Solution Types	pH
Sulfuric Acid (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	0.4
Hydrochloric Acid (HCl)	0.7
Sodium Hydroxide (NaOH)	13.7

Corrosion mechanism is a made up of oxygen reduction (Eq. 1 and Eq. 2) and hydrogen evolution reaction (Eq. 3 and Eq. 4) [36, 37].

Oxygen Reduction Reaction:



Hydrogen Evolution Reaction:



### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Mass Loss Calculation of HY 80 steels

The mass loss was calculated by equation 5,

$$\Delta M = M_{ini} - M_{fin} \quad (5)$$

Where  $M_{ini}$  (g) the mass at the beginning before it is corroded.  $M_{fin}$  (g) is the measured final mass after immersed in aggressive medium.

Submerged HY 80 plates in  $H_2SO_4$  solutions loss highest mass in all. There is a quite increase in mass loss during 28 days for  $H_2SO_4$  solution. Mass loss in percentage reaches to approximately 16% of initial mass for 28 days. Mass loss in submerged HY 80 plates in HCl solutions slightly increases to approximately 2.5 % of initial mass. The mass loss for NaOH solution is too low, almost zero as depicted in Figure 2. So, because of corrosion mechanism, material loss increased in different aggressive solutions in a certain period.

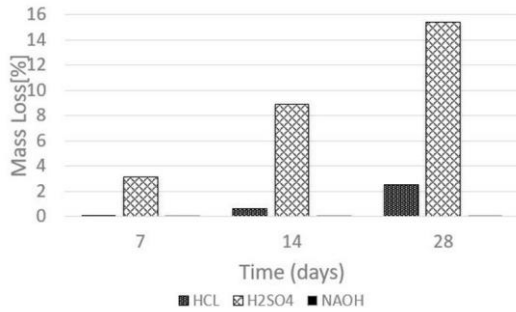


Figure 2. Mass loss of HY 80 plate steel

#### 3.2. Tensile Test of HY 80 Steels

In an engineering tension test, the engineering stress and strain are expressed as  $\sigma_{eng}$  and  $\epsilon_{eng}$  respectively, are calculated by measuring load and deflection using the original specimens having a cross-sectional area of  $A_i$  and a length of  $L_i$  as written in Eqs. 6 and 7.

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_i} \quad (6)$$

$$\epsilon_{eng} = \frac{L - L_i}{L_i} \quad (7)$$

To calculate true tensile stress,  $A$  is denoted as real cross-sectional area and continuously reduces during test until the specimens is fractured and the elongation is measured instantaneously to have true stress-strain curve [38]. The true tensile stress and strain are expressed in Eqs. 8 and 9.

$$\sigma_T = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} (1 + \epsilon_e) = \sigma_e (1 + \epsilon_e) \quad (8)$$

$$\epsilon_T = \int_{L_0}^L \frac{1}{L} dL = \ln \frac{L}{L_0} = \ln (1 + \epsilon_e) \quad (9)$$

#### 3.3. Effect of Corrosive Mediums on Yielding Strength, Ultimate Strength, Rupture Elongation and Impact Energy of HY 80 steels

HY 80 tensile samples prepared in different corrosive environments are tested. Average yield strength, ultimate strength and fracture elongation of non-corroded specimen are founded as 630.2 MPa, 765.5MPa and 27.5 % respectively as depicted in Figure 3, 5 and 7. The yield and ultimate strength slightly decrease during 28 day-period. Yield strength drops to 618.1MPa, 606.5 MPa and 619.9 MPa for 7 day-test in HCl,  $H_2SO_4$  and NaOH solutions respectively and 573.9MPa, 592.4MPa and 629.9 MPa for 14 day-test in HCl,  $H_2SO_4$  and NaOH solutions respectively as illustrated in Figure 3. Ultimate strength lowers to 746.7 MPa, 714.2 MPa and 733.4 MPa for 7 day-test in HCl,  $H_2SO_4$  and NaOH solutions respectively and 730.6MPa, 711.7 MPa for 14 day-test in HCl,  $H_2SO_4$  respectively as shown in Figure 5.

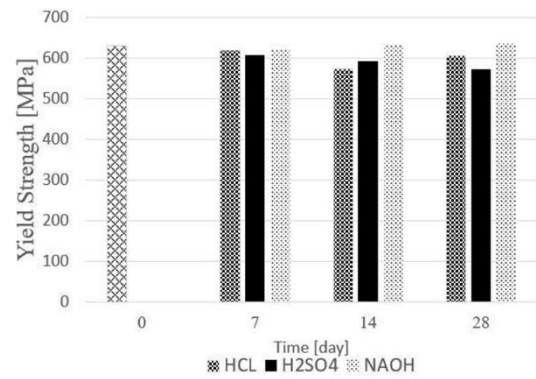


Figure 3. Yield strength of HY 80 steel immersed in different solutions

HCl and  $H_2SO_4$  solutions are more dominant in reduction of yield and ultimate strength. NaOH solution is not effective to lower the yield and ultimate strength. Reduction in yield and ultimate strength reaches up to 9.28 % and 14.11 % for aggressive medium of  $H_2SO_4$  solution respectively as illustrated in Figure 4 and 6. Reduction in yield strength of HY 80 steel immersed in solution of  $H_2SO_4$  shows a decreasingly increase character as depicted in Figure 4.

For HY 80 steel samples immersed in NaOH preserve the yield strength as shown in Figure 4. It is seen in Figure 4 that HCl solution causes reduction in yield strength of immersed HY 80 steels.

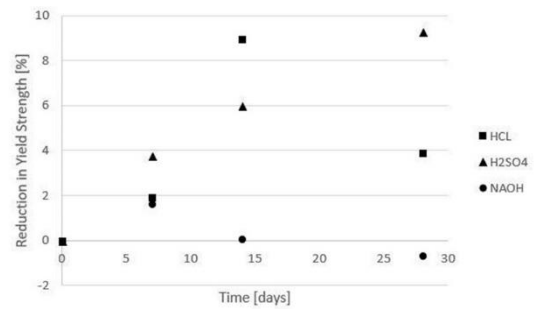
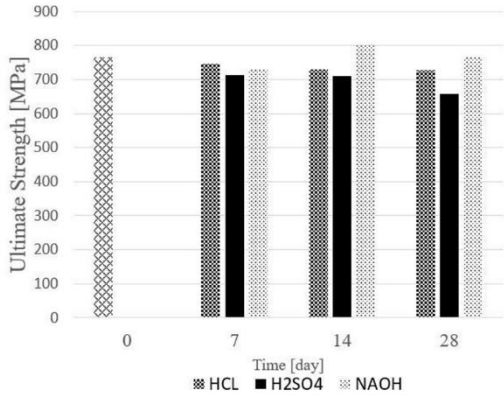


Figure 4. Yield strength reduction versus time

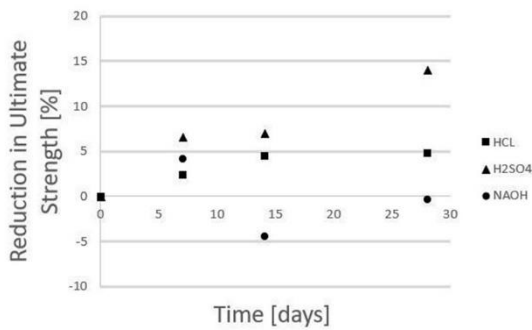
As shown in Figure 5 and 6, ultimate strength of immersed HY 80 steel samples in solution of HCl is decreased, the reduction in ultimate strength shows a decreasingly increase character.

Besides, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution effect ultimate strength of immersed samples and decrease the strength of the samples in 28 day-test period drastically as illustrated in Figure 6.

Ultimate strength of immersed HY 80 steel samples in solution of NaOH does not show a remarkable change as shown in Figure 5 and 6.



**Figure 5.** Ultimate strength of HY 80 steel immersed in different solutions



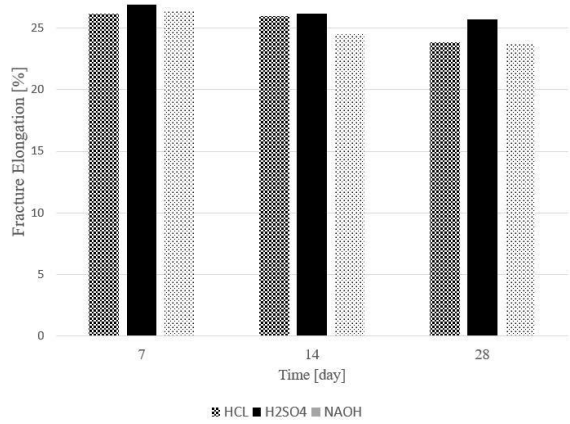
**Figure 6.** Ultimate Strength Reduction versus time

Especially, by the help of mass losing of specimens yield and ultimate strength of HY 80 steel have a tendency to reduce in acidic environment.

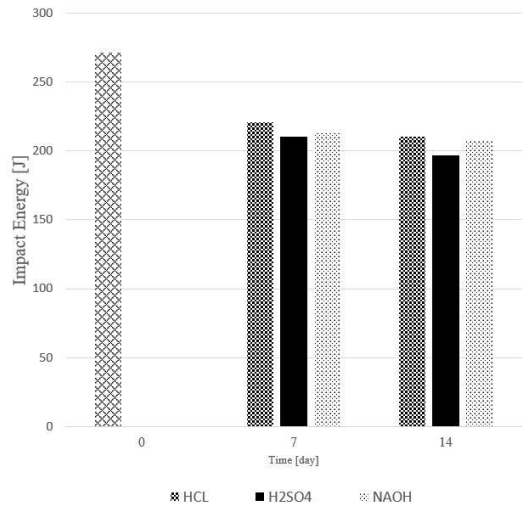
Fracture elongation defines the highest percentage permanent extension amount that occurs in the length of the tensile sample. This shows the ductility of the material. The more ductile the material, the more the deformation will occur [39].

Furthermore, fracture elongation is 26.2 %, 26.9 % and 26.4 % for 7 day-test in HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaOH solutions respectively, Fracture elongation drops to 26%, 26.2% and 24.5 % for 14 day-test in HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaOH solutions respectively and 23.85%, 25.7% and 23.8 % for 28 day-test in HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaOH solutions respectively as illustrated in Figure 7. Thus, HY 80 steel becomes less ductile as being submerged in corrosive mediums where corrosion reactions in Eqs. 3 and 4 take places. Also, corrosive medium affects the fracture toughness of HY 80 steel. HCl solution lowers impact energy to 220.5 J and 210.5 for 7 day-test and 14 day-test as depicted in Figure 8. Also, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> aggressive medium reduce impact energy to 210 J and 197 J for 7 day-test and 14 day-test. Furthermore, NaOH medium reduce impact energy to 212.5 J and 207 J for 7 day-test and 14 day-test. As shown in Figure 9, For all immersed HY 80 steel samples, the reduction in impact energy of HY 80 steels shows a decreasingly increase character in solutions of HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaOH. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution is the most effective solution in all to reduce the impact

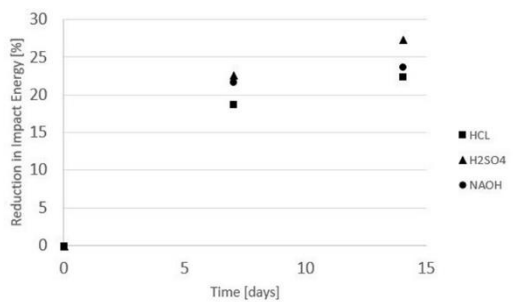
energy of HY 80 steel. Maximum reduction in impact energy was observed for 14 day-tested specimens in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution as depicted in Figure 9. So, the impact strength of HY 80 steel lowered due to H evolution reactions realized in acidic and salty solutions in Eqs. 3 and 4.



**Figure 7.** Fracture Elongation of HY 80 steel immersed in different solutions



**Figure 8.** Impact Energy of V-notched HY 80 steel



**Figure 9.** Impact energy reduction versus time

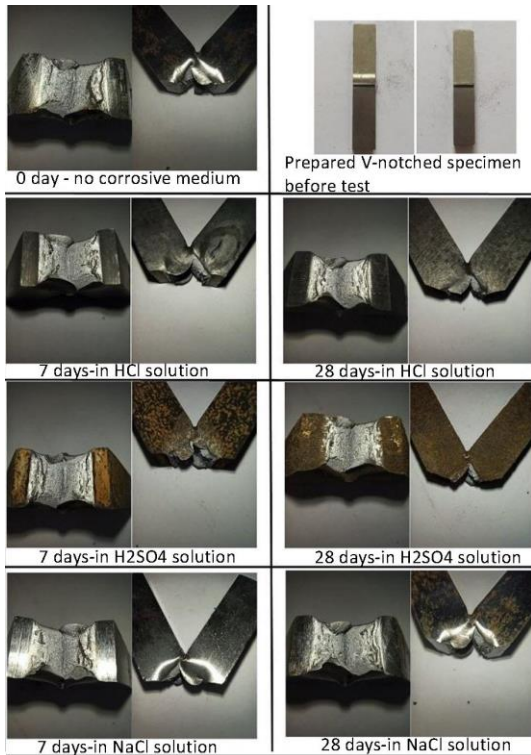
### 3.4. Fracture surface of specimens after Charpy-Impact Test

To characterize rupture surface 1 week-fractured V-notched and 4 week-fracture V-notched specimens were photographed for HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaOH solutions as shown in Figure 10. It is observed that the bright field on the fractured surface slightly increases when 1-week corroded fractured V-notched specimens

is compared to 4-week corroded fractured V-notched specimens for H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions as depicted in Figure 10.

**3.5. Fracture surface of specimens after Tensile Test**

To investigate the effect of corrosive mediums on the fractured surface of tensile specimens, the fractured surface of specimens are photographed in high definition and compared to each other. For non-corroded HY 80 specimens, the fractured surface shows ductile behaviour and have a cup and cone geometry as depicted in Figure 11. For HCl solutions, the cup and cone geometry of the fractured specimens is deteriorated after 28-day submerge. Also, especially, brittle mechanism is dominant on the fractured surface of HY 80 specimens in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions after submerged in 28 days as shown in Figure 11.



**Figure 10.** Fractured surface of V-notch Specimens

**4. Conclusions**

The specimens were immersed in acidic, alkaline solutions and mechanical properties such as yielding behavior and fracture toughness of HY 80 steels were investigated by applying tensile test, Charpy-impact test, measuring mass loss of HY 80 steel specimens. In the work, the yield strength of HY 80 steel reduces by 3.88 %, where as in the study of Li et al. there is a reduction of 4.08 % in yield strength of 250 mild steel [16]. In addition, the ultimate strength of aluminum alloy 8011 in NaCl solution reduces by 4.39% in the study of Mishra et al [29] while 4.87 % reduction was observed in the study for HY 80 steel for 28 days' immersion.

There was a 9.29 % decrease in fracture toughness of Q235 steel in soil solution for a 90 days' immersion period in the work of Hou et al. [9] while in the study for the case of immersion of HY 80 steel in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution, there is 27.44 % reduction in impact energy.

When the fracture surfaces are examined, a matte surface is observed in the 2-week-old sample, and the amount of bright fracture surface is higher in the 4-week-old sample. In the HCl



**Figure 11.** Fractured surface of tensile specimens

solution, the fracture surfaces are lipped. Ductile fracture has occurred. Fracture surfaces were observed to be similar to each other at 2 and 4 weeks of age. Fracture toughness energies were close to each other for 1 and 2 week immersed notched samples kept in NaOH solution. In the immersion process, hydrogen atoms were allowed to enter the sample. A slight decrease was observed in the fracture toughness of the samples in HCl and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions. It was observed that the ductility of the samples in the immersed HCl and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions decreased and the brittleness increased. The increase in brittleness causes the samples to break and damage suddenly without showing any symptoms. It was observed that the effect of corrosion on yield and tensile strength was limited, on the other hand, it affected the decrease in material ductility.

The results show that in aggressive environment such as H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and acidic medium of HCl, there is a certain corrosive effect in reduction of yield, ultimate strength and impact energy of HY 80 steel. So, much more resistive coatings can be applied on HY80 steel to minimize the corrosive effect on yield, ultimate strength and impact energy. However, in salty medium, for HY 80 steel, there is no notable effect in reduction of yield, ultimate strength,



NaCl solution has an effect in reduction of impact energy of HY 80 samples. Hence, in short term periods, HY 80 preserve its stability against corrosion in terms of yield and ultimate strength at salty medium, but for long term periods, it may require to be coated by an alternative resistive material.

In future studies, the corrosion behavior under stress can be investigated. With stress corrosion, many more hydrogen atoms can be allowed to penetrate the part during the same period.

#### Ethics committee approval and conflicts of interest

The authors declare no need for an ethics committee approval and no conflict of interest in this paper.

#### Author Contribution Statement

Buğra Yılmaz did tests.

Ergin Kosa did literature investigation, contributed to identification of conceptualization and methodology, drafting of article and critical review of content and final approval.

Şenol Durmuşoğlu did material preparation.

#### Nomenclature

F = force (N)

$A_i$  = initial cross sectional area ( $m^{-2}$ )

$A_o$  = original cross sectional area ( $m^{-2}$ )

$\sigma_{eng}$  = engineering stress ( $N m^{-2}$ )

$\epsilon_{eng}$  = engineering strain ( $mm mm^{-1}$ )

$\sigma_T$  = true stress ( $N m^{-2}$ )

$\epsilon_T$  = true strain ( $mm mm^{-1}$ )

$L_i$  = initial length (m)

$L_o$  = original length (m)

$M_{ini}$  = initial mass (g)

$M_{fin}$  = final mass (g)

$\Delta m$  = mass difference (g)

#### References

- [1] Bao, M., Ren, C., Lei, M., Wang, X., Singh, A. & Guo, X. 2016. Electrochemical behavior of tensile stressed P110 steel in CO<sub>2</sub> environment. *Corrosion Science*, vol. 112, pp. 585-595. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2016.08.021>.
- [2] Ma, H. C., Fan, Y., Liu, Z. Y., Du, C. W. & Li, X. G. 2019. Effect of pre-strain on the electrochemical and stress corrosion cracking behavior of E690 steel in simulated marine atmosphere. *Ocean Engineering*, vol. 182, pp.188-195.
- [3] Luo, J., Luo, S., Li, L., Zhang, L., Wu, G. & Zhu, L. 2019. Stress corrosion cracking behavior of X90 pipeline steel and its weld joint at different applied potentials in near-neutral solutions. *Natural Gas Industry B*, vol. 6(2), pp. 138-144. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2018.08.002>.
- [4] Prosek, T., Nazarov, A., Bexell, U., Thierry, D. & Serak, J. 2008. Corrosion mechanism of model zinc-magnesium alloys in atmospheric conditions. *Corrosion Science*, vol. 50(8), pp. 2216-2231. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.06.008>.
- [5] Liu, Y., Wang, Z., & Ke, W. 2014. Study on influence of native oxide and corrosion products on atmospheric corrosion of pure Al. *Corrosion Science*, vol. 80, pp. 169-176. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2013.11.027>.
- [6] Wang, X., Tang, X., Wang, L., Wang, C. & Guo, Z. 2014. Corrosion behavior of X80 pipeline steel under coupling effect of stress and stray current. *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 9(8), pp. 4574-4588.
- [7] Gong, K., Wu, M., Xie, F., Liu, G. & Sun, D. 2020. Effect of dry/wet ratio and pH on the stress corrosion cracking behavior of rusted X100 steel in an alternating dry/wet environment. *Construction and Building Material*, vol. 260, 120478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120478>.
- [8] Rudomilova, D., Prošek, T., Traxler, I., Faderl, J., Luckeneder, G., Schimo-Aichhorn, G. and Muhr, A. 2021. Critical Assessment of the Effect of Atmospheric Corrosion Induced Hydrogen on Mechanical Properties of Advanced High Strength Steel. *Metals*, vol. 11, 44. <https://dx.doi.org/10.3390/met11010044>.
- [9] Hou, Y., Lei, D., Li, S., Yang, W. and Li, C.-Q. 2016. Experimental Investigation on Corrosion Effect on Mechanical Properties of Buried Metal Pipes. *International Journal of Corrosion*, 5808372. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5808372>.
- [10] Liu, Z. Y., Li, Q., Cui, Z. Y., Wu, W., Li, Z., Du, C. W. & Li, X. G. 2017. Field experiment of stress corrosion cracking behavior of high strength pipeline steels in typical soil environments. *Construction and Building Material*, vol. 148, pp. 131-139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.058>.
- [11] Niazi, H., Eadie, R., Chen, W., & Zhang, H. 2020. High pH stress corrosion cracking initiation and crack evolution in buried steel pipelines: A review. *Engineering Failure Analysis*, 105013. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105013>.
- [12] Liu, G., Geng, J., Li, Y., Li, H., Wang, M., Chen, D., ... & Wang, H. 2021. Improved stress corrosion cracking resistance of in-situ TiB<sub>2</sub>/7050Al composite by pre-precipitation treatment. *Micron*, vol. 145, 103056. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2021.103056>.
- [13] Fernandez, I., Bairán, J. M. & Marí, A. R. 2015. Corrosion effects on the mechanical properties of reinforcing steel bars. *Fatigue and  $\sigma$ - $\epsilon$  behavior. Construction and Building Material*, vol. 101, pp. 772-783. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.139>.
- [14] Sonsino, C. M. 2021. Consideration of Salt-Corrosion Fatigue for Lightweight Design and Proof of Aluminium Safety Components in Vehicle Applications. *International Journal of Fatigue*, 106406. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106406>.
- [15] Ghazizadeh, E., Jabbari, A. H. & Sedighi, M. 2021. In vitro corrosion-fatigue behavior of biodegradable Mg/HA composite in simulated body fluid. *J. Magnes. Alloy*. <https://doi.org/10.1016/j.jjma.2021.03.027>.
- [16] Li, L., Mahmoodian, M. & Li, C. Q. 2018. Effect of corrosion on mechanical properties of steel bridge elements. In *Proceedings of 9<sup>th</sup> International Conference on Bridge Maintenance Safety and Management*.
- [17] Jebaraj, A. V., Aditya, K. V. V., Kumar, T. S., Ajaykumar, L. & Deepak, C. R. 2020. Mechanical and corrosion behaviour of aluminum alloy 5083 and its weldment for marine applications. *Materials Today: Proceedings*, vol. 22, pp. 1470-1478. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.505>.
- [18] Charalampidou, C., Dietzel, W., Zheludkevich, M., Kourkoulis, S. K. & Alexopoulos, N. D. 2021. Corrosion-induced mechanical properties degradation of Al-Cu-Li (2198-T351) aluminium alloy and the role of side-surface cracks. *Corrosion Science*, vol. 183, 109330. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109330>.
- [19] Liu, M. 2021. Effect of uniform corrosion on mechanical behavior of E690 high strength steel lattice corrugated panel in marine environment: a finite element analysis. *Material Research Express*, vol. 8, 066510. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac0655>.
- [20] Xu, L. Y. & Cheng, Y. F. 2012. An experimental investigation of corrosion of X100 pipeline steel under uniaxial elastic stress in a near-neutral pH solution. *Corrosion Science*, vol. 59, pp. 103-109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2012.02.022>.
- [21] Le, L., Sofi, M. & Lumantarna, E. 2021. The combined effect of stress and corrosion on mild steel. *Journal of Constructional Steel Research* vol. 185, 106805. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106805>.
- [22] Ren, R. K., Zhang, S., Pang, X. L. & Gao, K. W. 2012. A novel observation of the interaction between the macroelastic stress and electrochemical corrosion of low carbon steel in 3.5 wt% NaCl solution. *Electrochimica Acta*, vol. 85, pp. 283-294. <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2012.08.079>.
- [23] Necşulescu, D. A. 2011. The effects of corrosion on the mechanical properties of aluminium alloy 7075-T6. *UPB Scientific Bulletin*, vol. 73, pp. 223-229.
- [24] Kumar, S. R., Krishna, S. D., Krishna, M. D., Gokulkumar, N. T. & Akilesh, A. R. 2021. Investigation on corrosion behaviour of aluminium 6061-T6 alloy in acidic, alkaline and salt medium. *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 1878-1881. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.079>.
- [25] Hamidah, I., Solehudin, A., Hamdani, A., Hasanah, L., Khairurrijal, K., Kurniawan T., Mamt, R., Maryanti, R., Nandiyanto, A. & Hammouti, B. 2021. Corrosion of copper alloys in KOH, NaOH, NaCl, and HCl electrolyte solutions and its impact to the mechanical properties. *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60(2), pp. 2235-2243. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.12.027>.
- [26] Xu, S., Wang, H., Li, A., Wang, Y. & Su, L. 2016. Effects of corrosion on surface characterization and mechanical properties of butt-welded joints. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 126, pp. 50-62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.07.001>.



- [27] Dovletoglou, E., Skarvelis, P., Stergiou, V. & Alexopoulos, N. D. 2018. Effect of corrosion exposure on the mechanical performance of 2024 aluminum alloy electron beam welded joints. *Procedia Structural Integrity*, vol. 10, pp. 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.09.011>.
- [28] Rajput, A., Paik, J. K. 2021. Effects of Naturally-Progressed Corrosion on the Chemical and Mechanical Properties of Structural Steels. *Structures*, vol. 29, pp. 2120-2138. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.06.014>.
- [29] Mishra, R. K. 2020. Study the effect of pre-corrosion on mechanical properties and fatigue life of aluminum alloy 8011. *Materials Today: Proceedings*, vol. 25, pp. 602-609. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.375>.
- [30] Garbatov, Y., Soares, C. G., Parunov, J. & Kodvanj, J. 2014. Tensile strength assessment of corroded small scale specimens. *Corrosion Science*, vol. 85, pp. 296-303. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2014.04.031>.
- [31] Belkessa B., Giroud D., Ouali N., Cheniti B. Microstructure and Mechanical Behavior in Dissimilar SAF 2205/API X52 Welded Pipes. *Acta Metallurgical Sinica (English Letters)*, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40195-016-0428-8>.
- [32] Young G. W. 2012. Evaluation of Friction Stir Processing Of HY-80 Steel under Wet and Dry Condition. Naval Postgraduate School. Master's Thesis. Monterey, California.
- [33] Zhang L., Kannengiesser T. Austenite grain growth and microstructure control in simulated heat affected zones of microalloyed HSLA steel, *Materials Science and Engineering A* 613, pp. 326-335, 2014. <https://doi.org/doi:10.1016/j.msea.2014.06.106>.
- [34] Institute of Turkish Standards, Metallic materials – Tensile testing, part 1: method of test at room temperature.
- [35] Institute of Turkish Standards, Metallic materials, Charpy pendulum impact test, part 1: test method.
- [36] Marcus, P. 2011. *Corrosion mechanisms in theory and practice*. Crc Press.
- [37] Revie, R. W. 2008. *Corrosion and corrosion control*. John Wiley & Sons.
- [38] Davis, J. R. 2004. *Tensile Testing*, ASM International, USA.
- [39] Anonim, Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Malzeme Laboratuvarı I dersi çekme föyü. <https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/d7ee7cd9-f063-4669-8e1c-393503ed6ffb/cekme-deney-foyu.pdf> (date of access:08.08.2023)



RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALESİ

## In Situ Characterization of the Locked Particle Behavior of Sulfide Minerals Using Non-Destructive Electrochemical Measurements

### Sülfür Minerallerinde Bağlı Tane Davranışının Tahribatsız Elektrokimyasal Ölçümler Kullanılarak Yerinde Tayini

Damla İzerdem <sup>1\*</sup>, Zeliha Ertekin <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Hacettepe Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

Corresponding Author / Sorumlu Yazar\*: damlagucbilmez@hacettepe.edu.tr

#### Abstract

The flotation of sulfide minerals mostly depends on electrochemical reactions occurring on the mineral surfaces. Understanding the interaction mechanisms in the pulp is crucial for explaining the effects of different flotation chemicals on flotation performance. For this purpose, electrochemical techniques are used in the flotation of sulfide minerals by utilizing the semiconductor properties of these minerals. In this study, three non-destructive electrochemical measurements - open circuit potential (OCP), cyclic voltammetry (CV), and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) - were used to assess the electrochemical reactivity of the locked and liberated sulfide particles. Various combinations of mineral electrodes - Galena/Pyrite (0.52 cm<sup>2</sup>), Galena/Sphalerite (0.35 cm<sup>2</sup>), pure Galena (0.20 cm<sup>2</sup>), pure Sphalerite (0.80 cm<sup>2</sup>) and pure Pyrite (0.18 cm<sup>2</sup>) - were tested. A three-electrode electrochemical cell configuration was set up to investigate the electrochemical responses of the prepared electrodes. The changes in the surface chemistry of the mineral electrodes, in the presence (1×10<sup>-4</sup> M NaEX) and absence of a collector were compared in detail. During the process, charge transitions occurred between the minerals in the locked particle mineral electrode due to galvanic interactions regardless of the surface area. Thus, the flotation behavior of the minerals changed by reducing and oxidizing each other. The present study suggests that the electrochemical methods may be an alternative technique to the conventional batch scale flotation tests as they can easily monitor the effect of any flotation reagents in the system causing possible reactions that may occur on sulfide mineral surfaces.

**Keywords:** Sulfide Minerals, Surface Chemistry, NaEX, Cyclic Voltammetry, Electrochemical Impedance Spectroscopy

#### Öz

Sülfürlü cevher flotasyonu çoğunlukla, mineral yüzeyinde oluşan elektrokimyasal tepkimelere bağlıdır. Çeşitli flotasyon kimyasallarının flotasyon verimine etkisini anlamak açısından, palp içerisindeki karşılıklı tepki mekanizmalarını açıklayabilmek önemlidir. Sülfürlü minerallerin yarı iletken özelliklerinden yararlanılarak kullanılan elektrokimyasal yöntemler ile flotasyon uygulamalarında bu mekanizmalar ortaya konabilmektedir. Yapılan bu çalışmada, üç farklı tahribatsız elektrokimyasal yöntem - Açık Devre Potansiyeli (OCP), Dönüşümlü Voltametri (CV) ve Elektriksel Empedans Spektroskopisi (EIS) - kullanılarak bağlı ve serbest tanelerin elektrokimyasal tepkiselliğini ortaya koymak hedeflenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere çeşitli mineral elektrotları - Galen/Pirit (0,52 cm<sup>2</sup>), Galen/Sfalerit (0,35 cm<sup>2</sup>), saf Galen (0,20 cm<sup>2</sup>), saf Sfalerit (0,80 cm<sup>2</sup>) ve saf Pirit (0,18 cm<sup>2</sup>) - hazırlanmıştır. Üç elektrotlu elektrokimyasal hücre düzeni kurularak, hazırlanan mineral elektrotlarıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Mineral elektrotların yüzey kimyasındaki değişimler toplayıcı (1×10<sup>-4</sup> M NaEX) ve toplayıcısız ortamda denenerak kıyaslanmıştır. Bağlı tane mineral elektrotundaki ölçümler sırasında ortaya çıkan galvanik etkileşim sebebiyle, minerallerin yüzey alanından bağımsız olarak yük geçişlerinin olduğu tespit edilmiştir. Minerallerin birbirlerini indirgeyip yükseltgemeleri, flotasyon davranışlarının da değişmesine sebep olmuştur. Mevcut çalışmada kullanılan yöntemler, ortamdaki herhangi bir flotasyon reaktifinin sülfürlü mineral yüzeyinde meydana gelebilecek olası tepkimelere neden olan etkisini kolayca ölçülebilmektedir. Bu sebeple elektrokimyasal ölçümlerin, kesikli laboratuvar flotasyon testlerine alternatif bir yöntem olabileceği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Sülfürlü Mineraller, Yüzey Kimyası, NaEX, Dönüşümlü Voltametri, Elektriksel Empedans Spektroskopisi

#### 1. Introduction

Electrochemistry is one of the tools used for the surface characterization of sulfide minerals and the assessment of the adsorption mechanisms of flotation reagents on sulfide minerals. Most sulfide minerals have semiconducting properties. Thus, surface changes and reagent adsorption occur mainly through electrochemical mechanisms [1]. The electrochemical properties of these minerals enable their use as electrodes [2]; therefore,

electrochemical techniques can easily be applied to these minerals.

A comprehensive understanding of mineral surface chemistry is crucial for explaining the flotation processes. Various factors, including reagent types (collectors, depressants, and activators), pH levels, and dissolved oxygen content, can significantly influence the surface reactions of minerals. To explain these reactions, several techniques have been employed, such as

DOI:10.21205/deufmd.2024267709

Atf şekli / How to cite:

Izerdem, D., Ertekin, Z. (2024). In Situ Characterization of the Locked Particle Behavior of Sulfide Minerals Using Non-Destructive Electrochemical Measurements. DEUFMD, 26(77), 255-263.

Geliş Tarihi / Received: 02.04.2023

Kabul Tarihi / Accepted: 11.09.2023

contact angle measurements, surface analytical techniques such as X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry (TOF-SIMS), Raman Spectroscopy, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and electrochemical techniques [3–5]. While XPS provides valuable information about changes in the oxidation state of chemical elements on mineral surfaces, it is a costly and complex technique that requires extensive data processing. Simpler surface characterization methods, such as zeta potential and contact angle measurements, are also utilized for studying surface chemistry. However, it is essential to combine these techniques with other surface analytical methods to understand the interactions and species present on mineral surfaces in detail. Therefore, many researchers prefer electrochemical tools for the surface characterization of sulfide minerals, as they offer sensitivity, reproducibility, and high accuracy, enabling the in situ detection of surface layer formation on mineral electrodes. Surface responses of the minerals and problems in processes can be identified faster with electrochemical methods, which are also low cost compared to other techniques.

Some of the most common electrochemical techniques used in sulfide minerals are open circuit potential (OCP), cyclic voltammetry (CV), and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) [4,6]. The most beneficial part of the electrochemical method is being an alternative technique to the conventional batch-scale flotation tests for pre-screening of various flotation reagents.

OCP is an electrochemical technique often used to evaluate the resting potential of a system. This technique involves cathodic reduction of dissolved oxygen and oxidation of sulfide minerals [7]. In sulfide mineral flotation, OCP measurements are useful for monitoring changes either in the liquid phase or at the mineral/solution interface.

Electrochemical reactions at sulfide mineral surfaces are frequently investigated because the potential of a mineral is not always at an equilibrium state. In order to study such a dynamic state, it is necessary to follow the changes occurring when a certain amount of anodic or cathodic current has passed through the system. CV is a commonly used electrochemical technique to determine the reactions on the surface of sulfide minerals. In this technique, the potential of the mineral electrode is varied linearly at the desired rate using a potentiostat. When a current peak is observed during potential scanning, it can be used to identify the undergoing reaction.

EIS is based on the measurement of resistance and capacitance at the electrode surface and can be used to determine the species formed on mineral surfaces, regardless of the reaction type [8]. This analysis provides quantitative information about the conductance, dielectric coefficient, static properties of the interfaces of a system, and its dynamic change due to the adsorption mechanism, leading to the characterization of solid/liquid interfaces. As the formation of a non-conductive layer of oxides, hydroxides, elemental sulfur, or collector reagents causes an increase in resistance, EIS can be combined with the floatability of sulfide minerals.

Since the mineral-collector interaction is electrochemical, a sulfide mineral can be measured using the above-mentioned electrochemical techniques. Electrochemical methods can only be used successfully if there is measurable electron transfer due to the adsorption of collector molecules at the mineral electrode surface. EIS can be successfully used to measure the adsorption of different types of collectors on mineral electrode surfaces.

The effects of locked particles on flotation are thought to depend on the surface area of the mineral to be recovered [9]. However, galvanic interactions between minerals are observed in locked particles, regardless of the area [10]. Due to galvanic interactions, charge transitions between minerals have been observed [11]. Therefore, they reduce and oxidize each other, resulting in a change in the flotation behavior [12]. Investigation of the galvanic interactions of sulfide minerals by electrochemical techniques has been well documented by many researchers [13–15]. However, studies on the in situ electrochemical characteristics of sulfide minerals during galvanic reactions are limited, and further studies are required [7]. To our knowledge, the effect of the collector (NaEX) on frequently used sulfide minerals (pure Galena, pure Sphalerite, and pure Pyrite) and their locked particle (Galena/Pyrite, Galena/Sphalerite) behavior by simple, in situ process has not been presented by using electrochemical measurements so far.

The present study suggests a simple in situ method to understand the possible reactions occurring on the surface of sulfide minerals interacting with a collector using non-destructive electrochemical techniques. In this study, OCP, CV, and EIS techniques were performed in an alkaline solution (pH 9.2), where Galena, Pyrite, and Sphalerite electrodes were used to simulate free particles. Galvanic interactions occurring between the minerals and their effects on the surface chemistry were also investigated by simulating locked particle behavior. For this purpose, Galena/Pyrite and Galena/Sphalerite mineral pieces were paired to be in contact with each other and prepared binary-bounded mineral electrodes. The effects of sodium ethyl xanthate (NaEX) on the possible surface reactions were also studied.

A previous study [16] reported the surface changes in galena and pyrite minerals using electrochemical methods. In this work, in addition to these minerals, a pure sphalerite mineral and a binary bounded sphalerite mineral with galena were studied. The information gathered was then used to predict the equivalent circuit model.

## 2. Materials and Methods

According to their natural semiconductor properties, sulfide ores are adequate for obtaining reasonable electrochemical responses. For better electrochemical responses, the sulfide content of a mineral sample should be high. For this purpose, mineral electrodes composed of high purity sulfide ore samples (pure Galena, pure Sphalerite, and pure Pyrite) were tested to investigate the surface characteristics in this study.

Mineral electrodes were prepared as working electrodes by cutting a rectangular cross-section of the minerals (0.18-0.80 cm<sup>2</sup> geometric surface area) from a massive mineral specimen, mounting the mineral piece into an electrochemically inert epoxy resin, and placing it in a glass tube. The connection of the mineral electrode to the potentiostat/galvanostat was achieved using a copper wire.

In addition to the single use of mineral pieces in a mineral electrode, two sulfide minerals were also adhered to one another to simulate the locked particle behavior. For this purpose, Galena/Sphalerite and Galena/Pyrite mineral electrodes were also prepared. The mineral percentages present in the mineral electrodes are listed in Table 1.

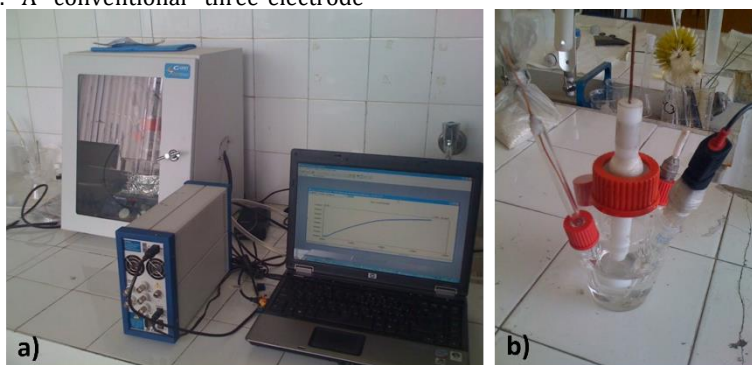
After each experiment, the surfaces of the mineral electrodes were polished with alumina paste to remove any contaminants for the next electrochemical process. After polishing the surface, the electrode was rinsed with distilled water and immediately transferred to a cell.

**Table 1.** Mineral content and geometric surface areas of the mineral electrodes.

Electrodes	Galena (%)	Pyrite (%)	Sphalerite (%)	Surface Areas (cm <sup>2</sup> )
Galena	100	-	-	0.20
Pyrite	-	100	-	0.18
Sphalerite	-	-	100	0.80
Galena/Pyrite	50	50	-	0.52
Galena/Sphalerite	50	-	50	0.35

Gamry Reference 600 model potentiostat/galvanostat was preferred to perform electrochemical techniques in this work. To isolate the system from external noise, the potentiostat was placed in a Faraday cage. A conventional three-electrode

electrochemical cell was used for electrochemical measurements. The experimental setup of the electrochemical studies is shown in Figure 1.

**Figure 1.** Experimental set-up of the studies (a); a conventional three-electrode cell (b)

A saturated calomel electrode (SCE) as a reference electrode, a platinum plate electrode with a 1 cm<sup>2</sup> area as the counter electrode, and mineral electrodes (Galena, Sphalerite, Pyrite, Galena/Pyrite, Galena/Sphalerite) were used in the electrochemical cell.

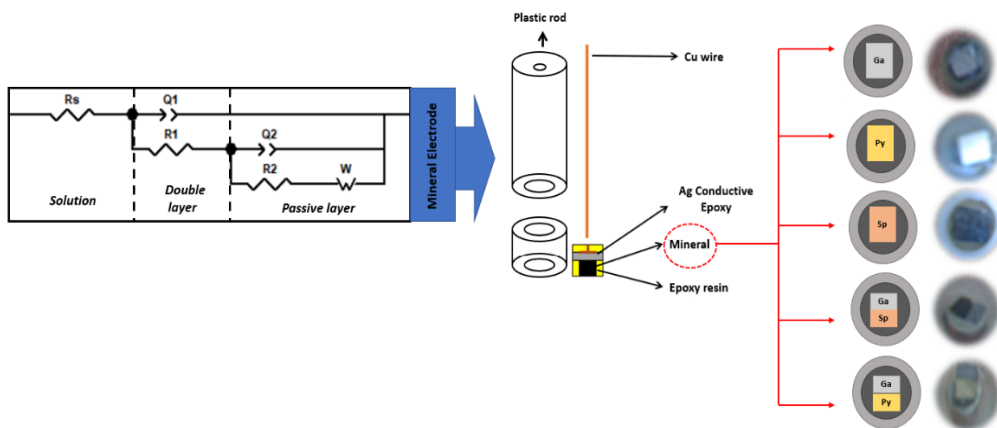
The choice of pH for the buffer solution in electrochemical processes involving sulfide minerals is typically determined based on the collecting ability of the chemical, surface chemistry of the minerals, and stability of the collectors. Adjusting the solution pH to a specific range can also help control the activation or depression of unwanted minerals or impurities. For NaEX and other xanthate collectors commonly used for sulfide minerals, a pH of approximately 9-10 is often preferred. In this pH range, the collector molecules are ionized, and their hydrophobic properties are enhanced, allowing them to adsorb onto the sulfide mineral surfaces more effectively [17]. Thus, sulfide minerals exhibit maximum floatability or optimal charge conditions. In this investigation, a buffer solution (pH 9.2) of sodium tetraborate decahydrate (0.05 M Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·10H<sub>2</sub>O, Merck ≥ 99.5%) at room temperature (~25 °C) was used to maintain the pH value at the same level during the measurements and to prevent possible pH changes as a result of the reactions between the minerals and the solution. The pH of the buffer solution was determined to be 9.2, and all electrochemical experiments were performed only at this pH.

Before each run for 15 minutes, high-purity nitrogen gas was introduced into the cell for intensive bubbling through the buffer solution to eliminate fluctuations during measurements due to oxygen present in the system. During the electrochemical measurements, the nitrogen flow was stopped, and the cell was completely sealed to prevent the diffusion of atmospheric oxygen into the system.

Xanthate collectors have found widespread application in the flotation processes of valuable minerals, particularly in the recovery of base metal sulfides [18]. It has been reported in the literature that xanthates have the highest rate of adsorption on pyrite samples compared to other types of collectors [19]. In electrochemical techniques, NaEX is commonly preferred for sulfide minerals because of its selectivity, stability, and low cost [20]. In this study, NaEX (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OCS<sub>2</sub>Na, Metsop ≥ 90%) was selected as the collector to gain insight into the specific reactions that may occur on the surface of sulfide minerals during their interaction with the collector.

To investigate the possible electrochemical reactions upon adsorption and oxidation of the collector on the mineral surfaces, electrochemical methods were studied in the absence and presence of a certain amount of collector. The NaEX concentration was adjusted to 1×10<sup>-4</sup> M since this concentration has been commonly employed in flotation studies and has widespread applications in the literature [21–23].

In this study, electrochemical techniques such as OCP, CV, and EIS methods were performed to investigate the changes in the surface characteristics of the locked and liberated particles. The OCP values of the mineral electrodes were recorded continuously for 30 min at pH 9.2. The CV was scanned through three cycles at a scan rate of 20 mV/s. EIS experiments were performed in the frequency range of 1×10<sup>5</sup> to 1×10<sup>-2</sup> Hz. The obtained EIS data of the prepared mineral electrodes in the absence and presence of NaEX were fitted to an equivalent electrical circuit model using Gamry Echem Analyst software. The design of each mineral electrode is illustrated together with the fitted equivalent circuit model given in Figure 2.



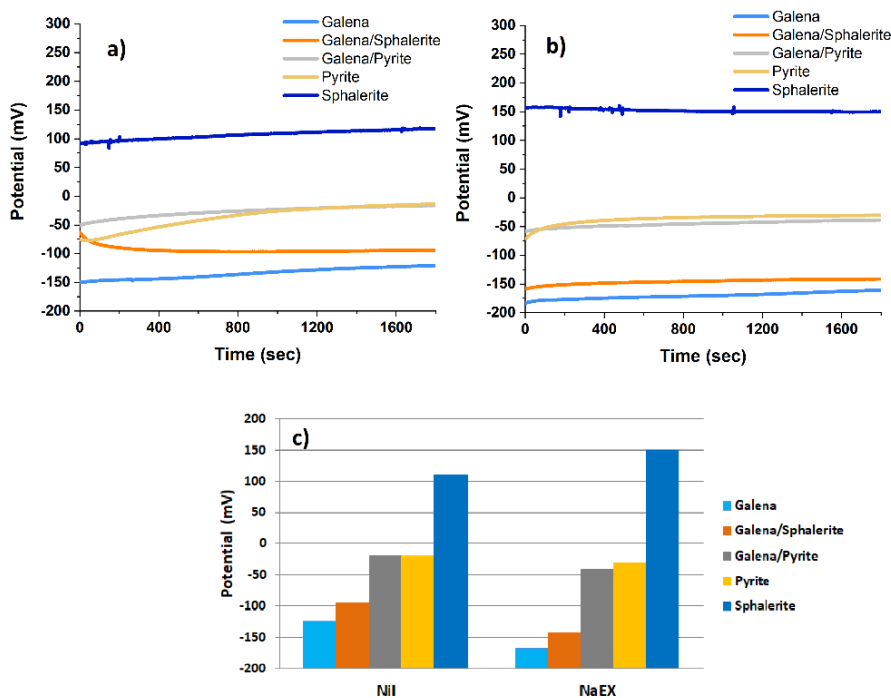
**Figure 2.** The equivalent circuit model for modeling the EIS data of the mineral electrodes and schematic representation of the mineral electrodes

**3. Results and Discussion**

The electrochemical responses of the mineral electrodes (Galena, Pyrite, Sphalerite) were studied in the absence and presence of  $1 \times 10^{-4}$  M NaEX using three methods: OCP, CV, and EIS measurements. To observe oxidation/reduction reactions between the locked particles and their possible galvanic interactions, two mineral pieces were glued together to produce two more electrodes (Galena/Pyrite and Galena/Sphalerite). The adsorption of the  $1 \times 10^{-4}$  M NaEX collector was also investigated in all the above-mentioned mineral electrodes using the same electrochemical techniques.

**3.1. Electrochemical responses of the mineral electrodes in terms of the OCP technique**

The OCP values of the mineral electrodes (Galena, Pyrite, and Sphalerite) and those coupled with the galena electrodes (Galena/Pyrite, Galena/Sphalerite) were recorded as a function of time, as shown in Figure 3. The OCP measurements of the samples were performed to compare their electrochemical reactivities in the absence (Figure 3a) and presence (Figure 3b) of the collector. The absence of a collector during the experiments is denoted as "Nil" in the figures.



**Figure 3.** Open Circuit Potential measurements of the mineral electrodes in the absence (a), presence of the collector (NaEX) (b), and graphical comparison of the OCP results (c); Nil: absence of collector; NaEX: presence of collector

According to the OCP results, all mineral electrodes showed less variation in potential value after initiation for approximately ten minutes. This indicates that a passive film spontaneously formed on its surface. Galena electrodes had lower OCP values than other mineral electrodes under both collector adsorption and collectorless conditions. When the Galena electrode was coupled

with Pyrite and Sphalerite electrodes, the OCP values were between those of Galena and their coupled electrodes. The obtained results are in good agreement with the mixed potential theory. Liu et al. (2018) have obtained a similar potential time profile when the chalcopyrite electrode was coupled with the pyrite electrode [7]. However, the voltage values decreased



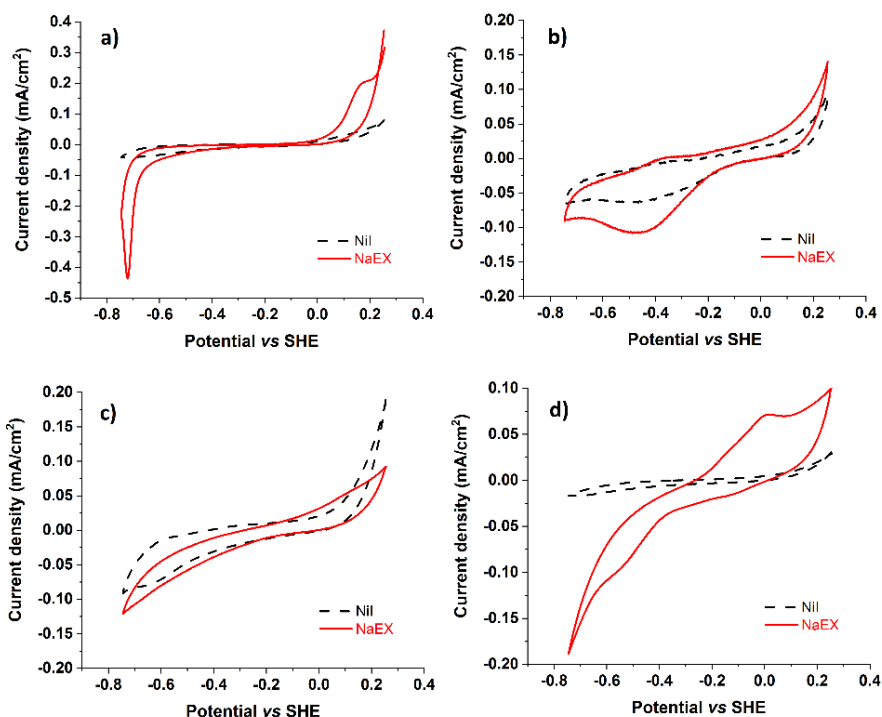
regardless of the mineral type when a collector was present in the system (Figure 3c). However, the Sphalerite electrode showed a different response. Additionally, this electrode had much higher voltage values than any other mineral electrode in both experiments. This indicates that the Sphalerite electrode is more electrochemically reactive than the other tested mineral electrodes, thus eliminating the individual usage of Sphalerite in the upcoming tests. Instead, only those locked with galena were chosen for further study. Further tests to reveal the surface characteristics of the other mineral electrodes were performed based on the CV and EIS test results.

**3.2. Electrochemical responses of the mineral electrodes in terms of the CV technique**

Comparative voltammetric studies were performed to identify galvanic interactions. All CV measurements were taken in three cycles, and the scan rate was determined to be 20 mV/s. All potential values reported in this study were converted to the

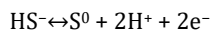
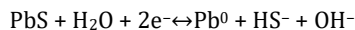
standard hydrogen electrode (SHE) scale by adding 245 mV to the saturated calomel electrode (SCE) readings [24]. Figure 4 represents the voltammograms of the mineral electrodes in the absence of any collector and in the presence of  $1 \times 10^{-4}$  M NaEX. In the cyclic voltammogram obtained without collector addition, Galena (collectorless) had a very narrow response interval in terms of current density over the whole potential range (-0.80 V to +0.40 V vs SHE).

When the scanning potential was initiated in the positive direction in the presence of the collector, an oxidation process where one small peak that begins near 0.20 V was observed (Figure 4a). This indicates the oxidation of Galena to form PbX. In the cyclic voltammograms of the Pyrite electrode, as the scanning potential became negative, a reduction peak was observed at nearly -0.450 V both in the presence and absence of a collector. A more apparent peak in the oxidation phase was observed at -0.365 V in the presence of the collector (Figure 4b).



**Figure 4.** Cyclic voltammograms of Galena (a), Pyrite (b), Galena/Pyrite (c), and Galena/Sphalerite (d) minerals in the presence and absence of the collector (NaEX); Nil: absence of collector; NaEX: presence of collector

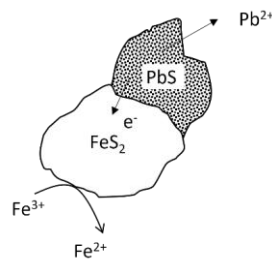
It is known that galena is thermodynamically unstable, and it reduces to the metallic form according to the galvanic interaction model shown in Figure 5. The reactions are as follows:



Therefore, the peak of the oxidation reaction almost disappeared and was barely detectable. In addition,  $S^0$  is not stable at high potential values, and oxidation causes the formation of porous thiosulfate and sulfates [25].

To identify the different processes in the locked particles involved in galena oxidation, voltammetric studies were carried out using Galena/Pyrite and Galena/Sphalerite mineral electrodes. Typical voltammograms of the positive scans on these electrodes are shown in Figure 4c and 5d. Peaks in the Galena/Pyrite and Galena/Sphalerite electrodes are related to the formation of PbX on the electrode surface by anodic oxidation

of the galena surface in the presence of the collector. The analysis of the voltammograms obtained in those conditions showed that the galena oxidation was associated with peaks at 0.20 V, 1.20 V, and 0 V in the mineral electrodes of Galena, Galena/Pyrite, and Galena/Sphalerite, respectively.



**Figure 5.** The galvanic interaction model for the pyrite-galena locked particle during flotation

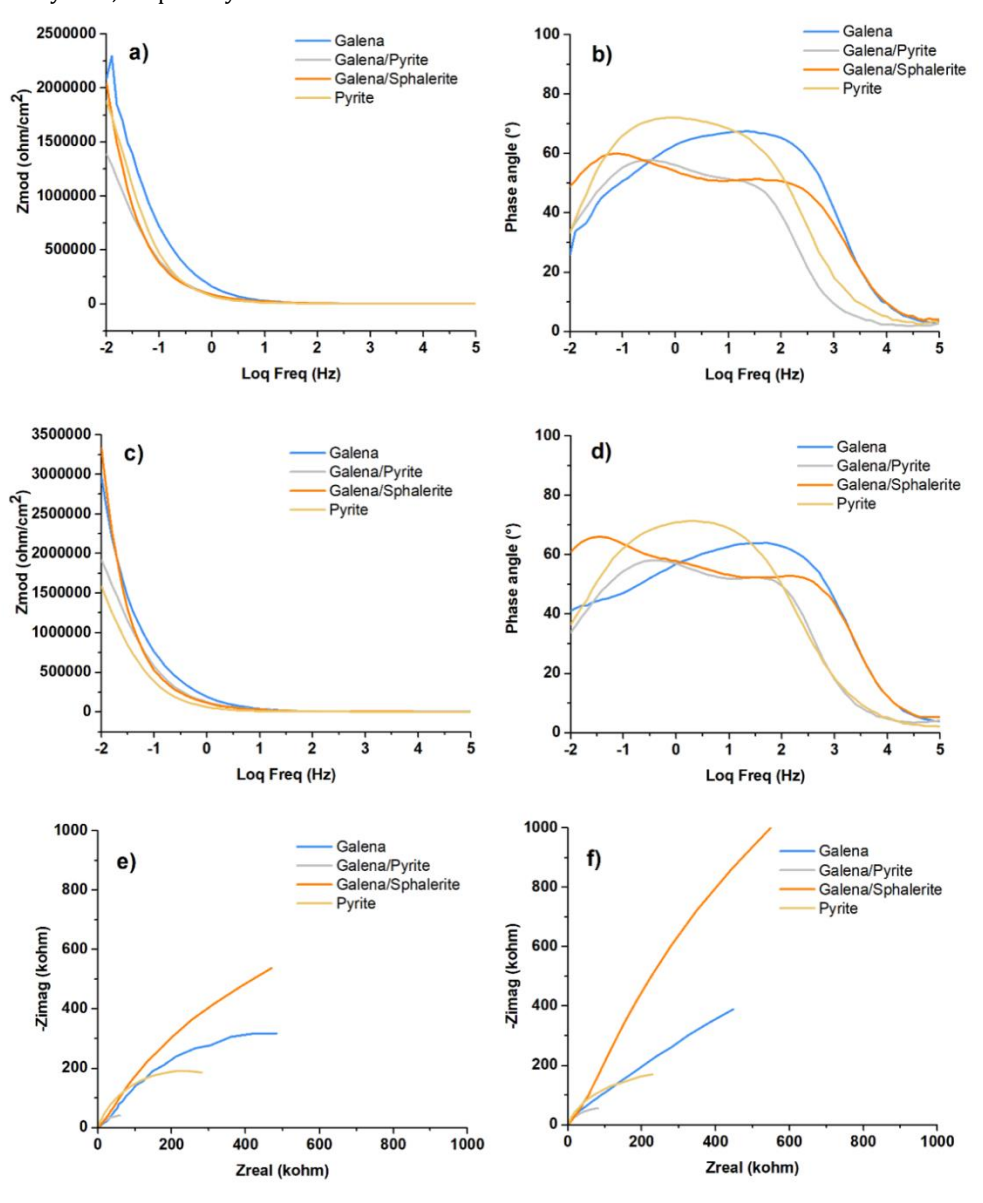
### 3.3. Electrochemical responses of the mineral electrodes in terms of the EIS technique

The differences between the surface characteristics of the studied mineral electrodes were also indicated by EIS measurements. The EIS test results for the different mineral samples are presented as Bode diagrams (in the form of Bode-Magnitude and Bode-Phase Angle) and Nyquist plots in the presence and absence of the collector, as shown in Figure 6. When the Bode diagrams were evaluated at the lowest frequency (0.01 Hz), the Galena electrode exhibited the highest  $Z_{mod}$  value among the other electrodes, indicating the lowest rate of adsorption. The Nyquist plot in Figure 6 exhibits a semicircular shape that is not fully formed. This incomplete semicircle suggests that the processes of mineral electrode oxidation and NaEX adsorption are primarily influenced by the charge transfer mechanism [26]. This EIS result is also compatible with the obtained OCP and CV results and shows a slightly inferior electrochemical reactivity compared to the other mineral electrodes.

There were significant differences when the collector was absent or present in the system, especially in the Galena and

Galena/Sphalerite electrodes. The results also help interpret the collector adsorption mechanisms, as at low frequencies, high phase angle values imply that the adsorption rates are low and diffusion-controlled [19]. This effect is more evident in the Nyquist plot for the Galena/Sphalerite electrode, where the radius of the semicircle curve of the electrode is notably greater in the presence of NaEX than in its absence.

The adsorption mechanisms of various reagents on sulfide minerals via electrochemical techniques have been investigated by many researchers [27–31]. To explain the surface characteristics of mineral electrodes, different equivalent circuit models can be used to describe the processes occurring on the electrode surfaces (mineral/collector/electrolyte junction). The  $Z_{mod}$  values at higher frequencies were typically low and mostly constant, reflecting the solution resistance. At medium frequencies, the relationships between  $Z_{mod}$  and the frequencies were linear. This explains the capacitive behavior caused by the electrical double layer at the mineral/solution interface and adsorption of NaEX [32].



**Figure 6.** EIS results of all the studied minerals in the absence (a, b) and presence (c, d) of NaEX as Bode diagrams and in the absence (e) and presence (f) of NaEX as Nyquist diagrams

In this study, the equivalent electrical circuit model (Figure 2) with the smallest chi-square ( $\chi^2$ ) value ( $\leq 1.09 \times 10^{-3}$ ) was chosen, as given in Table 2. Hence, the minimum errors of each element parameter were obtained. This equivalent model consists of a solution resistance ( $R_s$ ), double-layer capacitance ( $Q_{1,2}$ ), charge transfer resistance ( $R_{1,2}$ ), and Warburg ( $W$ ) element.  $Q$  is represented in terms of a constant phase element (CPE) that indicates a nonhomogeneous surface [4]. The charge transfer reactions are related to the electrochemical process, which occurs on the electrode surface and helps explain the adsorption of the collector. This is represented by  $R_{ct}$ , which explains the formation of the collector layer.

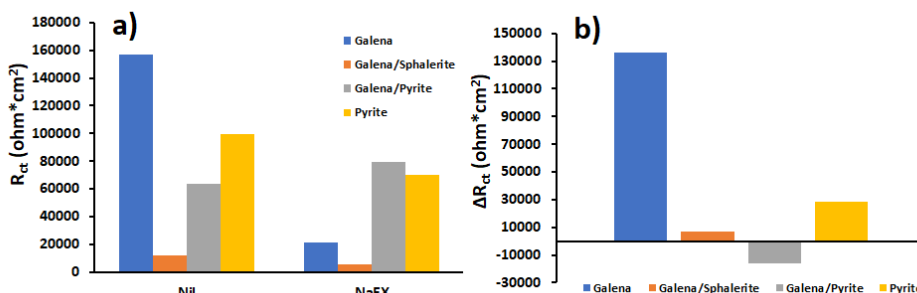
To compare the collector adsorption behavior of the prepared electrodes, the EIS spectrum of each experiment was fitted to the equivalent electrical circuit model, and their fitted electrochemical impedance element parameters are summarized in Table 2. The net rates of the electrochemical reactions on the electrode surfaces are represented by  $R_{ct}$  and are inversely proportional to the adsorption capacity of the collector [33]. The calculated  $R_{ct}$  values, which were compared to explain the mineral behavior in the absence and presence of the collector, are given in Figure 7.

**Table 2.** Fitted electrochemical impedance element parameters for the prepared mineral electrodes. (The equivalent electrical circuits used for modelling the EIS data are presented in Figure 2.)

Electrodes	$R_s$	$R_1$	$Q_1$	$n_1$	$Q_2$	$n_2$	$R_2$	$W$	Chi-squared/ $\chi^2$
	$\Omega \cdot \text{cm}^2$	$\Omega \cdot \text{cm}^2$	$S \cdot \text{cm}^{-2} \cdot s^{-n}$		$S \cdot \text{cm}^{-2} \cdot s^{-n}$		$\Omega \cdot \text{cm}^2$	$\Omega \cdot s^{-1/2} \cdot \text{cm}^{-2}$	
<u>Collectorless</u>									
Galena	$2.52 \times 10^1$	$6.67 \times 10^2$	$1.81 \times 10^{-5}$	0.86	$2.54 \times 10^{-5}$	0.57	$1.57 \times 10^5$	$3.93 \times 10^{-3}$	$5.26 \times 10^{-4}$
Galena/Sphalerite	$1.15 \times 10^2$	$6.41 \times 10^3$	$1.31 \times 10^{-5}$	0.72	$9.29 \times 10^{-6}$	0.81	$5.43 \times 10^3$	$7.43 \times 10^{-6}$	$2.21 \times 10^{-3}$
Galena/Pyrite	$8.77 \times 10^1$	$1.22 \times 10^3$	$4.52 \times 10^{-5}$	0.82	$7.94 \times 10^{-5}$	0.69	$6.24 \times 10^4$	$2.06 \times 10^{-3}$	$2.18 \times 10^{-4}$
Pyrite	$2.39 \times 10^1$	$2.57 \times 10^1$	$9.22 \times 10^{-5}$	0.81	$2.55 \times 10^{-10}$	0.98	$9.92 \times 10^4$	$5.14 \times 10^{-2}$	$1.09 \times 10^{-3}$
<u><math>1 \times 10^{-4} M NaEX</math></u>									
Galena	$2.99 \times 10^1$	$2.10 \times 10^4$	$2.50 \times 10^{-5}$	0.77	$3.21 \times 10^{-12}$	0.86	$5.25 \times 10^{-1}$	$3.05 \times 10^{-5}$	$2.22 \times 10^{-3}$
Galena/Sphalerite	$1.02 \times 10^2$	$2.72 \times 10^3$	$6.43 \times 10^{-6}$	0.78	$2.32 \times 10^{-5}$	0.61	$2.42 \times 10^3$	$9.03 \times 10^{-6}$	$1.39 \times 10^{-3}$
Galena/Pyrite	$6.91 \times 10^1$	$1.46 \times 10^3$	$3.08 \times 10^{-5}$	0.80	$5.40 \times 10^{-5}$	0.70	$7.80 \times 10^4$	$4.21 \times 10^{-4}$	$4.33 \times 10^{-4}$
Pyrite	$2.12 \times 10^1$	$2.51 \times 10^1$	$6.94 \times 10^{-5}$	0.80	$3.93 \times 10^{-5}$	0.83	$7.04 \times 10^4$	$5.89 \times 10^{-4}$	$2.08 \times 10^{-4}$

According to the  $R_{ct}$  values calculated in Figure 7a, the interaction between the Galena/Sphalerite mineral electrode and NaEX has the lowest  $R_{ct}$ , which indicates a higher rate of adsorption of the collector. In other words, it was less resistive and more capacitive than the other mineral electrodes. The EIS analysis results are compatible with the results of OCP and CV, which confirm that NaEX adsorption occurred at a much faster rate with the

Galena/Sphalerite mineral electrode. In addition, the  $R_{ct}$  values of the pure Galena and Pyrite electrodes decreased with the addition of NaEX, indicating the occurrence of collector adsorption. However, the Galena/Pyrite electrode showed a completely different adsorption behavior in the presence of NaEX.



**Figure 7.** Comparison of the total resistance ( $R_{ct}$ ) values (a) and their differences in  $R_{ct}$  ( $\Delta R_{ct}$ ) values (b) of the collector (NaEX) tested with the different mineral electrodes at pH 9.2; Nil: absence of collector; NaEX: presence of collector

The difference in  $R_{ct}$  of “Nil” and “NaEX” ( $\Delta R_{ct}$ ) was calculated to better comparison of the rate of adsorption of NaEX, given in Figure 7b. It can be seen that the  $\Delta R_{ct}$  of the prepared electrodes

has a positive value, except for the Galena/Pyrite electrode. This also shows that the collector molecules could adsorb onto the surface. The reason for the different behavior of the

Galena/Pyrite electrode may be the galvanic effect. Liu et al. (2018) demonstrated that galvanic interaction occurs when pyrite and galena are present together, and galena with a lower OCP value dissolves anodically [10]. On the other hand, better adsorption of NaEX on galena together with sphalerite can be attributed to the galvanic protection offered by sphalerite on galena, thereby avoiding its free oxidation [12]. It could be concluded that higher adsorption of NaEX is reached in the presence of the Galena/Sphalerite electrode, while Galena/Pyrite shows less adsorption behavior due to the galvanic interaction.

#### 4. Discussion

Electrochemical methods are important for controlling the flotation kinetics of sulfide minerals. Methods such as OCP, CV, and EIS help to gain an understanding of the relevance of galvanic interactions between locked particles, as it is an extensive consideration in assessing interactions between different sulfide minerals.

The presence of minerals, mineral associations, or chemicals in the process can change the electrochemical conditions in the pulp, which affects the flotation kinetics.

For example, the presence of galena in the system allows the observation of sphalerite oxidation, which cannot be observed with pure sphalerite alone.

It was revealed that the electrochemical reactivity of sulfide minerals and galvanic interactions favor the oxidation of electrochemically reactive minerals over other minerals in sulfide mineral flotation. The electrode potentials also indicate a decrease or increase in the reactivity of the minerals.

The use of electrochemical measurements in sulfide flotation can be described as a simple and feasible way to present the change in surface properties while changing the chemical conditions in the pulp.

#### 5. Conclusions

The surface changes of the pure mineral electrodes (Galena, Pyrite, Sphalerite) and locked-particle electrodes (Galena/Pyrite, Galena/Sphalerite) were observed using OCP, CV, and EIS methods.

Galvanic interactions play a major role in the locked-particle electrode surfaces and completely change the surface properties. When two sulfide minerals interacted with each other in the bulk solution as locked-particle electrodes, it was observed from the measured electrochemical techniques that their responses changed compared to the liberated pure mineral electrode responses.

The collector (NaEX) adsorption efficiencies and adsorption rates on the electrode surfaces were evaluated as a result of the electrochemical responses obtained from the measurement techniques. Despite the higher adsorption rate of NaEX on the Galena/Sphalerite electrode, less collector adsorption behavior was observed on the Galena/Pyrite electrode surface. This behavior indicates that the presence of pyrite in the system caused a decrease in galena reactivity. This was attributed to galvanic interactions on the mineral surfaces, thereby avoiding free oxidation.

Consequently, this study showed that EIS is a very promising technique to understand the possible reactions occurring on the surface of sulfide minerals interacting with flotation reagents. This method can be used as an alternative to conventional batch-scale flotation tests for monitoring instant changes at the mineral/solution interface. Further in situ electrochemical studies can be performed using various flotation reagents

(collectors, activators, depressants, and/or their mixtures) on different sulfide mineral electrodes.

#### Ethics committee approval and conflict of interest statement

This article does not require ethics committee approval.

This article has no conflicts of interest with any individual or institution.

#### Acknowledgment

The authors would like to acknowledge Prof. Dr. Zafir EKMEKCI for his support.

#### Author Contribution Statement

Damla Izerdem (1): Material preparation, laboratory studies, writing the first draft of the manuscript.

Zeliha Ertekin (2): Writing the latter version of the manuscript, fitting the EIS parameters using the software.

All authors read and approved the final manuscript.

#### References

- [1] Ekmekçi, Z. 2008. Electrochemistry in Sulphide Mineral Research, Surface Chemistry and Flotation lecture notes, Chapter 2, p. 8–26.
- [2] Peters, E. 1977. The Electrochemistry of Sulphide Minerals. pp 267–290. Bockris, J.O'M., Rand, D.A.J., Welch, B.J. eds. Trends in Electrochemistry. Springer, New York, NY, 408 p. DOI: 10.1007/978-1-4613-4136-9\_16
- [3] Chehreh C.S., Hart, B. 2014. TOF-SIMS Studies of Surface Chemistry of Minerals Subjected to Flotation Separation - A Review, Miner Eng, 57, p. 1–11. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.12.001
- [4] Ertekin, Z., Pekmez, K., Kappes, R., Ekmekçi, Z. 2021. Application of EIS Technique to Investigate the Adsorption of Different Types of Depressants on Pyrite, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 57(3), p. 112–126. DOI: 10.37190/ppmp/136022
- [5] Zhang, W., Sun, W., Hu, Y., Cao, J., Gao, Z. 2019. Selective Flotation of Pyrite from Galena Using Chitosan with Different Molecular Weights, Minerals, 9(9) p. 549. DOI: 10.3390/min9090549
- [6] Tercero, N., Nagaraj, D.R., Farinato, R. 2019. A Critical Overview of Dithiophosphinate and Dithiophosphate Interactions with Base Metal Sulfides and Precious Metals, Min Metall Explor, 36, p. 99–110. DOI: 10.1007/s42461-018-0039-1
- [7] Liu, Q., Chen, M., Zheng, K., Yang, Y., Feng, X., Li, H. 2018. In Situ Electrochemical Investigation of Pyrite Assisted Leaching of Chalcopyrite, J Electrochem Soc, 165(13), p. H813–H819. DOI: 10.1149/2.0461813jes
- [8] Zhao, S., Guo, B., Peng, Y., and Mai, Y. 2017. An Impedance Spectroscopy Study on the Mitigation of Clay Slime Coatings on Chalcocite by Electrolytes, Miner Eng, 101, p. 40–46. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.09.027
- [9] Vianna, S.M., Franzidis, J., Manlapig, E.V., Silvester, E., Ping-hao, F. 2003. The Influence of Particle Size and Collector Coverage on the Floatability of Galena Particles in a Natural Ore, XXII International Mineral Processing Congress, 29 September–3 October, Cape Town, 816–826.
- [10] Liu, Q., Li, H., Zhou, L. 2009. Experimental Study of Pyrite-Galena Mixed Potential in a Flowing System and its Applied Implications, Hydrometallurgy, 96(1–2), p. 132–139. DOI: 10.1016/j.hydromet.2008.09.002
- [11] Gök, Ö., Güler, E., Seyrankaya, A. 2012. Electrochemical Behavior of Chalcopyrite in Acidic Solutions, MT Bilimsel, 1(2), p. 35–47.
- [12] Urbano, G., Meléndez, A.M., Reyes, V.E., Veloz, M.A., González, I. 2007. Galvanic Interactions between Galena-Sphalerite and their Reactivity, Int J Miner Process, 82(3), p. 148–155. DOI: 10.1016/j.minpro.2006.09.004
- [13] Rao, S.R., Finch, J.A. 1988. Galvanic Interaction Studies on Sulphide Minerals, The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science, 27(4), p. 253–259. DOI: 10.1179/cmj.1988.27.4.253
- [14] Mielczarski, E., Mielczarski, J.A. 2003. Influence of Galvanic Effect on Adsorption of Xanthate on Pyrite, Galena and Chalcopyrite, XXII International Mineral Processing Congress, 29 September–3 October, Cape Town, 866–873.
- [15] Moslemi, H., Shamsi, P., Alimohammady, M. 2012. Electrochemical Properties of Pyrite, Pyrrhotite, and Steel: Effects on Grinding and Flotation Processes, J South Afr Inst Min Metall, 112 (10), p. 883–890.
- [16] Izerdem, D. 2022. Surface Chemistry of the Locked Particles for Sulphide Minerals, 27th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, 22–25 March, Antalya, 855–863.

- [17] Hu, Y., Sun, W., Wang, D. 2009. *Electrochemistry of Flotation of Sulphide Minerals*, SPRINGER, Berlin, Heidelberg, 210 p. DOI: 10.1007/978-3-540-92179-0
- [18] Gungoren, C., Baktarhan, Y., Demir, I., Ozkan, S.G. 2020. Enhancement of Galena–potassium Ethyl Xanthate Flotation System by Low Power Ultrasound, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30(4), p. 1102–1110. DOI: 10.1016/S1003-6326(20)65281-5
- [19] Ertekin, Z., Pekmez, K., Ekmekçi, Z. 2016. Evaluation of Collector Adsorption by Electrochemical Impedance Spectroscopy, *Int J Miner Process*, 154, p. 16–23. DOI: 10.1016/j.minpro.2016.06.012
- [20] Rao, S.R., Finch, J.A. 1987. *Electrochemical Studies on the Flotation of Sulphide Minerals with Special Reference to Pyrite-Sphalerite—I. Cyclic Voltammetry and Pulp Potential Measurements*, *The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science*, 26(3), p. 167–172. DOI: 10.1179/cmj.1987.26.3.167
- [21] Yin, W., Xue, J., Li, D., Sun, Q., Yao, J., Huang, S. 2018. Flotation of Heavily Oxidized Pyrite in the Presence of Fe Ni Digenite Particles, *Miner Eng*, 115, p. 142–149. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.10.016
- [22] Guo, B. 2015. The Poisoning of Pyrite Surface upon Xanthate Adsorption by Cyanide in Mildly Acidic Media, *Electroanalysis*, 28(4), p. 724–732. DOI: 10.1002/elan.201500355
- [23] Jiang, C.L., Wang, X.H., Parekh, B.K., Leonard, J.W. 1998. The Surface and Solution Chemistry of Pyrite Flotation with Xanthate in the Presence of Iron Ions, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 136(1-2), p. 51–62. DOI: 10.1016/S0927-7757(97)00250-1
- [24] Chander, S. 1988. *Electrochemistry of Sulfide Mineral Flotation*, *Min Metall Explor*, 5(3), p. 104–114.
- [25] Güler, T. 2018. Redox Behavior of Galena in Alkaline Condition, *Ionics*, 24, p. 221–227. DOI: 10.1007/s11581-017-2172-0
- [26] Mu, Y., Peng, Y., Lauten, R.A. 2015. Electrochemistry Aspects of Pyrite in the Presence of Potassium Amyl Xanthate and a Lignosulfonate-Based Biopolymer Depressant, *Electrochim Acta*, 174, p. 133–142. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.05.150
- [27] Güler, T., Şahbudak, K., Çetinkaya, S., Akdemir, Ü. 2013. Electrochemical Study of Pyrite-Ovalbumin Interaction in Relation to Flotation, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(9), p. 2766–2775. DOI: 10.1016/S1003-6326(13)62795-8
- [28] Qin, W., Wang, X., Ma, L., Jiao, F., Liu, R., Gao, K. 2015. Effects of Galvanic Interaction between Galena and Pyrite on Their Flotation in the Presence of Butyl Xanthate, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(9), p. 3111–3118. DOI: 10.1016/S1003-6326(15)63940-1
- [29] Wang, X.-H. 1995. Interfacial Electrochemistry of Pyrite Oxidation and Flotation.: Effect of Borate on Pyrite Surface Oxidation, *J Colloid Interface Sci*, 178(2), p. 628–637. DOI: 10.1006/jcis.1996.0160
- [30] Hu, Y., Wu, M., Liu, R., Sun, W. 2020. A Review on the Electrochemistry of Galena Flotation, *Miner Eng*, 150, 106272. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106272
- [31] Morey, M.S., Grano, S.R., Ralston, J., Prestidge, C.A., Verity, B. 2001. The Electrochemistry of PbII Activated Sphalerite in Relation to Flotation, *Miner Eng*, 14(9), p. 1009–1017. DOI: 10.1016/S0892-6875(01)00108-X
- [32] Ekmekci, Z., Becker, M., Tekes, E.B., Bradshaw, D. 2010. An Impedance Study of the Adsorption of CuSO<sub>4</sub> and SIBX on Pyrrhotite Samples of Different Provenances, *Miner Eng*, 23(11–13), p. 903–907. DOI: 10.1016/j.mineng.2010.02.007
- [33] Mu, Y., Li, L., Peng, Y. 2017. Surface Properties of Fractured and Polished Pyrite in Relation to Flotation, *Miner Eng*, 101, p. 10–19. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.11.012





# Kum Bentonit Karışımında Sızıntı Suyunun Hidrolik İletkenliğe Etkisi

## The Effect of Leachate on the Hydraulic Conductivity of a Sand Bentonite Mixture

Seda Durukan 

Manisa Celal Bayar Üniversitesi Manisa Teknik Bilimler MYO, Manisa, TÜRKİYE  
Sorumlu Yazar / Corresponding Author\*: seda.durukan@cbu.edu.tr

### Öz

Bu çalışmada düzenli atık depolama sahaları altında geçirimsiz tabaka olarak da kullanılan kum-bentonit karışımlarının sızıntı suyu karşısındaki geçirimsizlik davranışı incelenmiştir. Bu amaçla kum-bentonit karışımı içerisinde sızıntı suyunun geçirildiği esnek duvarlı hidrolik iletkenlik deneyine tabi tutulmuştur. Literatürde genel olarak musluk suyu ya da yapay kirleticiler ile gerçekleştirilen hidrolik iletkenlik deneyleri, bu çalışmada orijinal sızıntı suyu ile gerçekleştirilmiştir. Sızıntı suyu olarak da Ege Bölgesinden seçilen bir katı atık depolama sahasından elde edilen sızıntı suları kullanılmıştır. Kum-bentonit karışımının oranı kuru ağırlıkça %10 bentonit içerecek şekilde hazırlanmıştır. Deney esnasında sızıntı suyunun giriş ve çıkış sıvılarının bazı kimyasal analizleri de gerçekleştirilmiştir. Ölçülen hidrolik iletkenlik değerlerinin sınır koşullara yakın olmak kaydı ile, kriterleri sağladığı belirlenmiştir. Bununla beraber, musluk suyu sonuçlarına göre artış görüldüğü de dikkati çekmiştir. Ortam pH'ı tüm deneylerde bazik olarak ölçülmüştür. Sızıntı suyuna ait giriş sıvısının elektriksel iletkenliğinin, tüm örneklerin çıkış sıvılarının elektriksel iletkenliğine oranı 1'in altında kalmıştır. Bu durum deneyin sonlandırıldığı anda katyon değişimlerinin sonlanmadığını işaret etmektedir. Son olarak da giriş ve çıkış sıvılarından bazı alkali ve toprak alkali metali iyonlarındaki değişimler ölçülmüş, karışımdaki kilin sızıntı suyu maruziyeti altında mineral yapısındaki değişimler belirlenmiş ve hidrolik iletkenliğe etkisi de tartışılarak sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Geçirimsiz Tabaka, Kum Kil Karışımları, Sızıntı Suyu, Hidrolik İletkenlik

### Abstract

The permeability behavior of sand-bentonite mixtures which are used as liner, was investigated by using original leachate. In this regard, the flexible wall hydraulic conductivity tests were performed. In literature, the conventional test procedures generally comprise the permeability values of the liners by using tap water, this study suggested determining the hydraulic conductivities under the effect of leachate. Thus, leachate samples were taken from a municipal solid waste site located in the Aegean region. The selected proportion is 10% bentonite as the dry weight for a sand-bentonite mixture. Some chemical analyses were also done for the inlet and outlet leachate samples. It is found that the mixture ensures the hydraulic conductivity criteria for landfill liners while it approaches the critical value. Also, it should be noted that the hydraulic conductivity with leachate was found to be more than that of with tap water. The pH of the environment for each test was found to be basic. The electrical conductivity values for each test were found to be under 1. This situation implies that the cation exchange process was not completed. Finally, some alkaline and alkaline earth metals were measured in both inlet and outlet fluids, changes in the mineral structure of the clay in the mixture under leachate exposure were determined and their effect on the hydraulic conductivity was discussed.

**Keywords:** Landfill Liner, Sand-Bentonite Mixtures, Leachate, Hydraulic Conductivity

### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction

Many studies have been conducted on impervious layer or barrier applications and filtration studies in landfills [1-9]. According to the data obtained from the studies to date, the desired properties of liners are low hydraulic conductivity, high adsorption capacity, resistance to changes in temperature and water content, suitable mechanical properties to ensure continuity during and after the construction phase, low cost and abundant availability. Clays are the first liner material that comes to mind with their low hydraulic conductivity and high adsorption capacity. However, studies have shown that clays are highly affected by temperature and water content changes;

cracks are formed in the impermeable material and therefore engineering parameters are far from the desired level. Since clays do not give the desired results under the influence of temperature and water content changes, the idea of mixing them with sands has been proposed [10]. As a result, bentonite, which has the lowest hydraulic conductivity among the clay types, was mixed with sand. The sand-bentonite mixture (SBM) gave the desired result and no cracks were observed after temperature and water content changes. Hydraulic conductivity studies of liner materials in landfills are usually carried out using tap water. Values obtained using tap water can only provide a baseline, a reference value and cannot explain the behavior under the influence of leachate in the field. When the adsorption studies

carried out to determine the behavior of liners against the pollutants are examined, it is seen that pollutants are generally used individually or in controlled synthetic mixtures in experiments conducted in laboratories [11-13]. This situation in laboratory research is far from reflecting the real conditions in the field. On the other hand, it is very difficult to determine the adsorption and retention behavior of the liner exposed to such a complex chemical mixture. In most of the studies conducted with original leachate, differences in the chemical diversity and characteristics of leachate have been presented and have been reported to have a strong influence on soil chemistry and properties [14, 15]. In this study, a SBM sample was tested in the presence of selected leachate and the hydraulic conductivity value was determined under the influence of contaminants in the original leachate mixture.

### Materials and Methods

The mixture was obtained by mixing the sand material sieved under No.10 sieve with powdered bentonite passed from No.200 sieve. Some basic geotechnical properties of the soils used in this study are presented in Table 1 below. Leachate from Harmandalı (H) Solid Waste Landfill selected from the Aegean region was used as leachate. The leachate from this landfill was chemically analyzed by inductively coupled argon plasma (ICP-OES) and presented in Table 2. After the hydraulic conductivity test with this leachate, which was used as inlet fluid, the effluent fluid were also analyzed and compared with the same method. Hydraulic conductivity test was conducted according to ASTM D5084. In addition, to monitor the changes in the mineralogical structure of the clay in the mixture, XRD analysis of the clay was performed before and after the experiments.

### Results and Discussion

During the flexible-wall hydraulic conductivity experiments with SBM-H, outlet fluid was collected and pH and electrical conductivity (EC) were measured both initially and at different times. The pH value of the effluents indicated that the environment was basic. The pH values measured in this study are higher than the most efficient pH values for the adsorption mechanism reported in the literature. The pH values of the effluents of the SBM-H sample were higher than 8 and sometimes even exceeded 9. When the ratio of the outlet EC values to the inlet EC values is analysed, an increase for equilibration after a sudden decrease was seen as expected. A ratio less than 1 indicates that the cation exchange has not yet been completed at the time the experiment was terminated.

According to the average of the last 5 experimental data, the hydraulic conductivity value of the SBM-H sample was measured as  $5.10 \cdot 10^{-10}$  m/s (Figure 4). Although the measured value is below the limit value of  $10^{-9}$  m/s, it can be said that it is at the critical stage. Looking at the hydraulic conductivity values determined with tap water presented in Figure 1, it is seen that the values measured for 10% SBM samples vary between  $2.10 \cdot 10^{-10}$  m/s and  $3.10 \cdot 10^{-12}$  m/s. It was determined that the hydraulic conductivity values measured with leachate found to be more than that for tap water. It was stated that the chemistry of the leachate caused an increase in the hydraulic conductivity. When the effluent of 10% SBM-H sample is compared and evaluated with the initial leachate, it is observed that alkali and alkaline earth metals except Ca decreased until approximately 0.6 pore volumes of flow (Figure 5). Ca ion showed a significant increase up to 0.6 pore

volumes of flow and then tended to decrease rapidly. In other words, the 10% SBM-H sample released the Ca element from the beginning to the middle of the experiment and then this process was reversed. Considering that the hydraulic conductivity value determined with tap water for samples with the same compaction parameters as in this study was in the order of  $10^{-12}$  m/s, it is seen that the hydraulic conductivity value increased almost for three magnitudes for SBM-H. One reason for this may be the replacement of  $\text{Ca}^{+2}$  with  $\text{Na}^{+}$  ions. If the hydraulic conductivity graph (Figure 4) of this sample is examined, it can be seen that the hydraulic conductivity value, which tends to decrease until approximately 0.6 pore volumes of flow, increases after 0.6 pore volumes of flow. However, considering the complex chemistry of leachate, this cannot be shown as the only reason. Nevertheless, it has been shown in other studies that hydraulic conductivity increases with increasing ion concentration [27-29]. In addition, when the pH exceeds 9, it suggests that the mineralogical structure of the clay in the mixture may have been affected. Therefore, XRD analyses were performed to determine the state of the clay in the mixture before and after leachate percolation and the results are presented in Figure 6.

The most interesting point in Figure 6 is the decrease in montmorillonite peaks. It was even observed that some peaks disappeared. It can be clearly seen from the XRD graphs that the leachate chemistry has changed the clay mineralogy. Many factors such as mineral arrangement in clays and even surface position affect XRD results [30], but in terms of preliminary findings, it is seen that the structure of montmorillonite mineral exposed to leachate has changed. This also contributes to the explanation of the increase in the hydraulic conductivity value in the leachate-exposed sample. However, it is clear that a detailed study on the subject is also needed.

### Conclusion

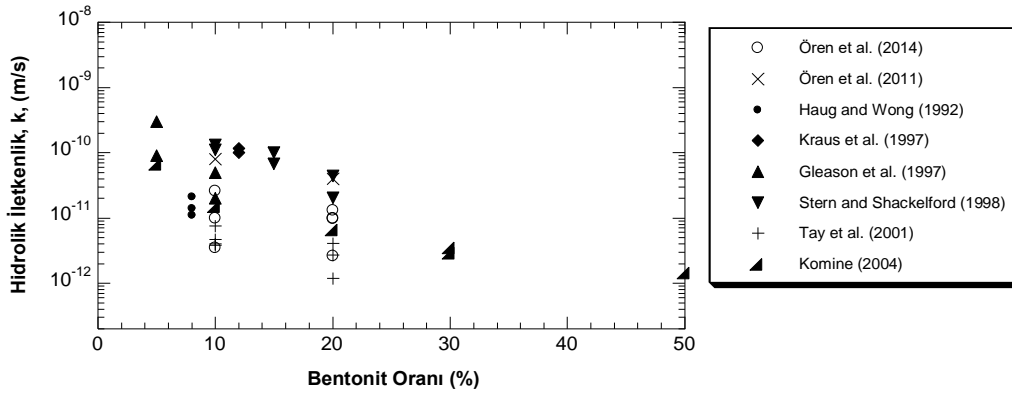
The main findings of the study are summarized below.

- Leachate from a solid waste landfill was investigated and some chemical properties were presented.
- The hydraulic conductivity value for 10% SBM-H was  $5.10 \cdot 10^{-10}$  m/s. During this process, such changes in the mineralogical structure of the clay were detected.
- The pH values of the inlet fluids of the leachate are found to be basic. The pH values of the effluents increased and exceeded 9 for such measurements. This pH environment is far from the adsorption environment suitable for a clayey soil. In addition,  $\text{Na}^{+}$  and  $\text{Ca}^{+2}$  ions were found to be exchanged.
- The hydraulic conductivity experiments were terminated after reaching one pore volumes of flow, so the results do not include a long-term evaluation.
- No bacterial growth was observed in the samples during the experimental period, and a decrease in hydraulic conductivity values can be expected with bacterial growth in long-term analysis. Long-term hydraulic conductivity values can be investigated in future studies.
- For future studies, it is strongly recommended to investigate under which conditions and how the leachate affect on the mineralogical structure in detail.

## 1. Giriş

Düzenli atık depolama sahalarında geçirimsiz tabaka ya da bariyer uygulamaları ve filtreleme çalışmaları ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır [1-9]. Günümüze kadar yapılan çalışmalardan elde edilen verilere göre geçirimsiz tabakalarda olması istenen özellikler; düşük hidrolik iletkenlik, yüksek adsorpsiyon kapasitesi, sıcaklık ve su içeriğindeki değişimlere karşı dayanıklılık, inşaat aşamasında ve sonrasında süreklilik sağlayacak uygun mekanik özellikler, ucuz maliyet ve bol miktarlarda bulunabilirliktir. Killer, düşük hidrolik iletkenlikleri ve yüksek adsorpsiyon kapasiteleri ile akla ilk gelen geçirimsiz tabaka malzemesidir. Bununla beraber, yapılan araştırmalar göstermiştir ki; killer sıcaklık ve su içeriği değişimlerinden oldukça fazla etkilenmekte; geçirimsiz malzemede çatlaklar oluşmakta ve dolayısıyla mühendislik parametreleri de istenilen düzeyden uzaklaşmaktadır. Killerin sıcaklık ve su içeriği

değişimleri etkisinde arzu edilen sonucu vermemesi üzerine, kumlarla karıştırılması fikri öne sürülmüştür [10]. Sonuç olarak kil çeşitlerinin arasından en düşük hidrolik iletkenliğe sahip olan bentonit ile kum karıştırılarak kullanılmıştır. Kum-bentonit karışımı (KBK) istenilen sonucu vermiş; ayrıca sıcaklık ve su içeriği değişiminden sonra çatlaklar da gözlenmemiştir. Bu uygulamanın öncülleri olarak Kleppe ve Olson (1985) gösterilmektedir [10]. Düzenli atık depolama sahalarında geçirimsiz tabaka malzemelerinin hidrolik iletkenlik araştırmaları genellikle musluk suyu kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Literatürdeki KBK'lara ait musluk suyu ile yapılmış bazı hidrolik iletkenlik deneylerinin sonuçları Şekil 1'de sunulmuştur. Bu çalışmalar farklı bentonit oranlarında ve yine farklı kompaksiyon su içeriklerinde gerçekleştirilmiştir. Geçirimsiz tabakalar için sağlanması istenen sınır değer olan  $10^{-9}$  m/s değerinin tüm deney örneklerce sağlandığı görülmektedir.



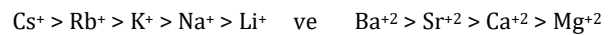
Şekil 1. Kum-bentonit karışımlarının musluk suyu ile elde edilen hidrolik iletkenlik değerleri

Figure 1. Hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures with tap water

Musluk suyu kullanarak elde edilen değerler ancak bir temel referans değer oluşturup sahada kirletici suyu etkisi altındaki davranışı açıklayamazlar. Geçirimsiz tabakaların düzenli atık depolama sahalarında maruz kalacakları kirleticilere karşı davranışlarını tespit etmek üzere gerçekleştirilen adsorpsiyon çalışmaları incelendiğinde ise laboratuvarlarda yapılan deneylerde genelde kirleticilerin tek tek ya da kontrollü sentetik karışımlar halinde kullanıldığı görülmektedir [11-13]. Bradshaw ve Benson (2013) geosentetik killer için gerçekleştirdikleri deneylerde ana inorganik katyon konsantrasyonlarının, gerçek sızıntı suyunu temsil ettiği anda ölçülen hidrolik iletkenlik değerinin kabul edilebilir düzeyde olduğunu belirtmişlerdir [12]. Oysa kirleticiler düzenli atık depolama sahalarında serbest bir karışım halinde bulunmaktadır ve kompleks bir kimyasal düzen içerisindedirler. Laboratuvar araştırmalarındaki bu durum sahadaki gerçek koşulları yansıtmaktan uzaktadır. Bununla beraber, bu kadar karmaşık bir kimyasal karışıma maruz kalan geçirimsiz tabakanın adsorpsiyon ve tutulum davranışını belirlemek de oldukça güçtür. Orijinal sızıntı suyu ile yapılan çalışmaların çoğunda ise sızıntı sularının kimyasal çeşitlilikleri ve karakteristiklerindeki farklılıklar sunulmuş ve zemin kimyasını ve özelliklerini de oldukça etkilediği belirtilmiştir [14, 15]. Kuvvetli asidik ve bazik özellikler ( $pH < 3$  ve  $pH > 11$ ) taşıyan sızıntı sularının ise kil minerallerini çözdürdüğü de ortaya konmuştur [16-18]. Bununla beraber, uzun dönem etkisi olarak biyolojik etkenler de dikkati çekmiş ve bakteri oluşumunun hidrolik iletkenliği düşürdüğü belirtilmiştir [19, 20]. Abdellah vd. (2020) çalışmalarında kil minerallerinin sızıntı suyu karşısında değişimini X-ışını kırınım yöntemi (XRD) kullanarak incelemiş ve kilin kimyasal yapısında farklılaşmalar

söz konusu olduğunu belirtmiştir [18]. Buna göre, sızıntı suyuna maruz kalan kilin kristobalit ve montmorillonit oranında bir azalma tespit etmişlerdir. Benzer bir tespit Xiang vd. (2019) tarafından da yapılmış olup yüksek alkali çözeltilerin geçirildiği zeminlerde bentonit miktarında azalma olduğundan bahsedilmiştir [17]. Ek olarak, zeminin çözeltilere maruz kaldığı süre uzadıkça azalmanın da arttığı belirtilmiştir. Sızıntı suyunun geçirimsiz tabakaların hidrolik iletkenliğine olan etkisi üzerine kapsamlı bir araştırma (Özçoban vd. 2022) çalışmaların genel olarak kil tabakaları ve geosentetik killerden oluştuğunu göstermiştir [21].

Bu çalışmada ise KBK örnekleri, seçilen sızıntı suyu varlığında teste tabi tutulmuş ve hidrolik iletkenlik değeri orijinal sızıntı suyu karışımındaki kirleticilerin etkisi altında belirlenmiştir. Oldukça karışık bir kimyasal içeriği olan sızıntı suları zemin örneklerinden geçirildiğinde, davranışı hem tahmin etmek hem de takip etmek oldukça zordur. Bununla beraber, yeraltı suyundaki en önemli katyon değişimlerinin alkali ve toprak alkali elementleri arasında gerçekleştiği bilinmektedir. Bu kapsamda, hidrolik iletkenlik deneyinin öncesinde ve sonrasında giriş ve çıkış sıvılarından örnekler alınmış ve hedeflenen bazı alkali ve toprak alkali metallerindeki değişimler ölçülmüştür. Kumun herhangi bir adsorpsiyon kapasitesinin olmadığı düşünüldüğünde kimyasal reaksiyonların sadece kil zeminde gerçekleşeceği bilinmektedir ve killerdeki alkali ve toprak alkali elementlere karşı adsorpsiyon ilgisi ise aşağıdaki gibidir [22].



Genel anlamda 2 değerlikli iyonların adsorpsiyon ilgisi tek değerlikli iyonlardan büyüktür. Bununla beraber,  $\text{Na}^+$  ve  $\text{Ca}^{+2}$  iyonlarının değişim reaksiyonunun bentonitler (smektit grubu) için şişme kapasitesi ve geçirirliliği direkt olarak etkilemesi sebebi ile ayrı bir önemi de bulunmaktadır.  $\text{Na}^+$  ve  $\text{Ca}^{+2}$ 'nin hidratlaşmış iyon çapları; iki hidratlaşmış  $\text{Na}^+$  bir  $\text{Ca}^{+2}$ 'den daha fazla alan gerektirecek şekildedir. Bu nedenle, değişim alanlarında  $\text{Ca}^{+2}$ 'nin  $\text{Na}^+$  ile yer değiştirmesi kilin kristal kafes boyutlarında büyümeye neden olmaktadır. Bunun bir sonucu olarak da geçirgenlikte bir azalma meydana gelmektedir. Dolayısı ile zemin örneğindeki  $\text{Na}^+$  ve  $\text{Ca}^{+2}$  adsorpsiyonu ya da değişimi hidrolik iletkenliğinin değişimini açıklamakta oldukça tutarlı sonuçlar vermektedir. Bu çalışma kapsamında da giriş ve çıkış konsantrasyonlarının ölçümü ve karşılaştırması amacı ile  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  ve  $\text{K}^+$  iyonları seçilmiştir. Bununla beraber, karışımın içindeki bentonitin sızıntı suyuna maruz kalması ile mineralojik yapısında bir değişim olup olmadığı da XRD araştırmaları ile incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Çalışmada malzeme olarak doğal zeminler ve bir katı atık depolama sahasından elde edilen sızıntı suları kullanılmıştır. Granüler zeminlerden kum (K), Aydınlar Kum (Turgutlu-Manisa) şirketinden sağlanmıştır. Kil olarak ise montmorillonit minerali ağırlıklı bir bentonit (B) seçilmiş olup Karakaya Bentonit (Ankara) firmasından elde edilmiştir, bu malzemedeki kil oranı hidrometre ile belirlenmiştir. Karışımlar ise No.10 eleğin altında kalacak şekilde elenen kum malzemenin No.200 eleğin altındaki toz bentonit ile karıştırılması ile elde edilmiştir. Hidrolik iletkenlik deneylerine tabi tutulacak zemin karışımlarında kullanılacak olan malzemelerin bazı temel geoteknik özellikleri de belirlenmiş ve aşağıda Tablo 1'de sunulmuştur. Zemin örneklerindeki kum oranı toplam ağırlığın %90'ı olacak şekilde hazırlanmıştır. Diğer bir deyişle %10 KBK dendiğinde toplam kuru ağırlığın %10'unun bentonit ve %90'ının da kum oluşturmaktadır.

Standart Proctor enerjisi ile karışımların sıkışma parametreleri (optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık) belirlenmiş ve seçilen sıkışma parametreleri ile sıkıştırılıp hazırlanan zemin örnekleri hidrolik iletkenlik testine tabi tutulmuş ve direkt yoldan permeabilite değerlerine ulaşılmıştır.

**Tablo 1.** Zeminlerin bazı geoteknik özellikleri

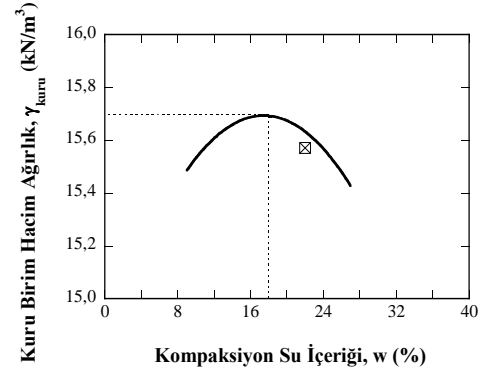
Özellikler	Bentonit	Kum
Mineraloji	Smektit Kristabolit Kuvars	Kuvars
Dane Çapı		
Dağılımı		
Çakıl	%0	%100
Kum	%4	%100
Silt	%21	%0
Kil	%75	%0
Kıvam Limitleri		
Likit limit	%405	
Plastik limit	%57	NP*
Plastisite İndisi	%348	
Özgül Ağırlık	2,71	2,65

\*NP: Non-plastik

Hidrolik iletkenlik deneyi ASTM D5084'e göre yürütülmüştür [23]. Hidrolik iletkenlik deneyleri akış boşluk hacminin 1'e ulaşması ve giriş-çıkış sıvılarının oranının en çok  $\pm$ %25 değerine sahip olması koşulu üzerine sonlandırılmıştır. Deney süreleri 2-3

ay sürmüştür. Standart Proctor kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılarak hazırlanan örnekler için sıkışma eğrisi ve hidrolik iletkenlik deneyine tabi tutulmak üzere seçilen ikili değer Şekil 2'de sunulmuştur.

Çöp alanları ve atıklar sosyo-ekonomik düzeylere göre çeşitlilik göstermektedirler. Ülkeler ve hatta şehirler arasında oldukça belirgin farklılıklar oluşmaktadır. Bu yüzden her bölgenin atıklarından meydana gelen sızıntı suları da farklılık göstermektedir. Sızıntı sularının karakterizasyonu, bariyer ya da filtre malzemesi seçiminde birincil derecede önem arz etmektedir. Bu çalışmada Ege bölgesinden seçilen Harmandalı (H) Katı Atık Sahalarından elde edilen sızıntı suları incelenmiştir.



**Şekil 2.** Deneylerde kullanılan karışımların sıkıştırma parametreleri

**Figure 2.** Compaction parameters of soil in this study

Harmandalı sızıntı suyu geçirilen zemin örneği de KBK-H olarak isimlendirilmiştir. Bu katı atık depolama sahasından elde edilen sızıntı sularının induktif eşleşmiş argon plazma (ICP-OES) ile kimyasal analizi yapılmıştır. ICP-OES analizlerinde Agilent-5110 tip cihaz kullanılmıştır. Giriş sıvısı olarak kullanılacak olan bu sızıntı suları ile hidrolik iletkenlik deneyi sonrasında aynı yöntemlerle çıkış suları da analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Sızıntı sularının bazı kimyasal analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Sızıntı suları kimyasal analizi

**Table 2.** Chemical analyses of leachate

İçerik	Miktar
pH	8,60
EC*	32600 $\mu\text{S}/\text{cm}$
KOİ*	5600 mg/L
BOİ*	4000 mg/L
TOM*	% 0,43
Sertlik ( $\text{CaCO}_3$ )	1740 mg/L
$\text{NH}_3\text{-N}$	2254 mg/L
Al	0,19 mg/L
As	0,37 mg/L
Fe	12,7 mg/L
Mn	0,067 mg/L
Ca	24,8 mg/L
Mg	403 mg/L
Na	2832 mg/L
K	1193 mg/L
Ni	0,71 mg/L
Zn	0,17 mg/L
Pb, Cu, Hg	<0,01 mg/L

\*EC elektriksel iletkenlik, KOİ kimyasal oksijen ihtiyacı, BOİ biyolojik oksijen ihtiyacı ve TOM ise total organik madde anlamına gelmektedir.

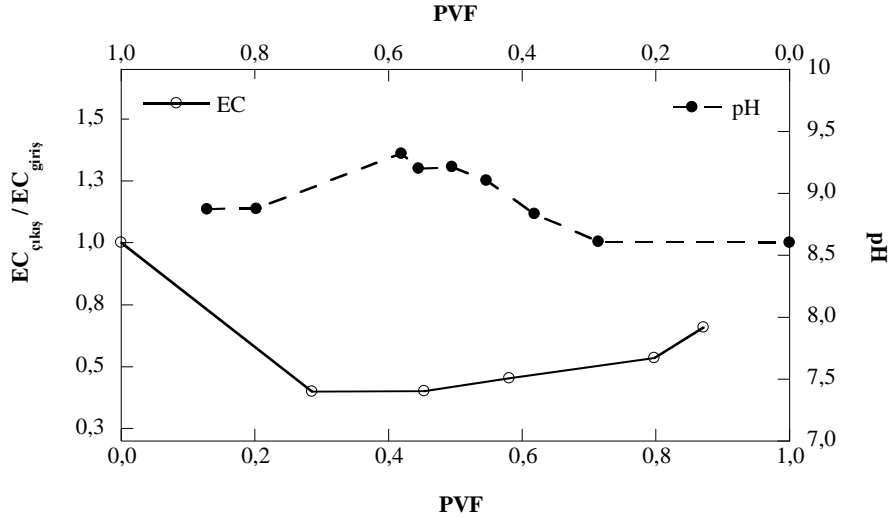
Karışımdaki kilin kristal yapısındaki değişimlerin izlenmesi amacı ile de deneylerden önce ve sonra kile ait XRD incelemesi gerçekleştirilmiştir. Öncesinde kullanılan toz bentonit hazır olarak mevcutken deney sonrası için hidrolik iletkenlik deneyinde kullanılan numune parçalanarak No.200 elekten geçirilmiş ince daneli malzeme kullanılmıştır. XRD dedektörü olarak PIXcel 1D sistemi ve anod malzemesi olarak bakır (Cu) X-ray kaynağı bulunurken, değerlendirmelerde de PANalytical X'Pert HighScore kullanılmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

KBK-H ile gerçekleştirilen esnek duvarlı hidrolik iletkenlik deneyleri sırasında zemin örneklerinden geçirilen sızıntı suları toplanmış ve hem başlangıçta hem de farklı zamanlarda pH ve elektriksel iletkenlikleri (EC) ölçülmüştür. İlgili değerler akış boşluk hacmine (pore volumes of flow - PVF) göre sunulmuştur. Çıkış sularının pH değerlerindeki değişim başlangıç durumundan itibaren sırası ile ve EC değerlerindeki değişim ise çıkış sularının EC değerinin başlangıç EC değerine oranı olarak Şekil 3'te sunulmuştur. Zemin örneklerinden elde edilen çıkış sularının pH'ları değerlendirildiğinde, zemin örneğinde sızıntı suları için önce bir artış ardından azalma görülmektedir. Çıkış

sularının pH değeri ortamın bazik olduğuna işaret etmektedir. Literatür çalışmalarında bentonit için Cr elementi hariç ağır metaller için en iyi adsorpsiyon ortam pH değeri genelde 6 olarak gösterilmekte ve 8'den yüksek pH seviyelerinde metal adsorpsiyonunun azaldığı belirtilmektedir [24]. Cr elementinin adsorpsiyonu için ise en elverişli ortamın daha asidik koşullarda olduğu pH'ın 2-4 arasında olmasının en uygun koşullar olduğu belirtilmiştir. Bununla beraber, Abollino vd. (2003)'nin çalışmasında montmorillonit için gerçekleştirilen deneylerde Cr, Ni, Mn ve Zn için düşük asidik pH'larda adsorpsiyonun %80 oranında gerçekleştiği; Cd, Pb ve Cu içinse bu değerlere ulaşabilmek için pH değerinin 5'ten yüksek olması gerektiği belirtilmiştir [25]. Bu çalışmada ölçülen pH değerleri, literatürde bildirilen adsorpsiyon mekanizması için en verimli pH değerlerinden yüksektir. KBK-H örneğine ait çıkış sularının pH değerleri 8'den yüksektir hatta bazen 9'u geçtiği görülmektedir. Bu durum, metaller için çökelmenin gerçekleştiği pH ortamına denk geldiği ve adsorpsiyon mekanizması için çok da verimli olmayan bir ortama girildiğini işaret etmektedir.

Çıkış sularının EC değerlerinin başlangıç sıvısının EC değerine oranı incelendiğinde ise, tüm örneklerde beklendiği üzere ani bir düşüş sonrası dengeleme belirten bir artış gözlenmektedir. Oranın 1'den küçük olması ise deneyin sonlandırıldığı anda kation değişiminin henüz tamamlanmadığına işaret etmektedir.



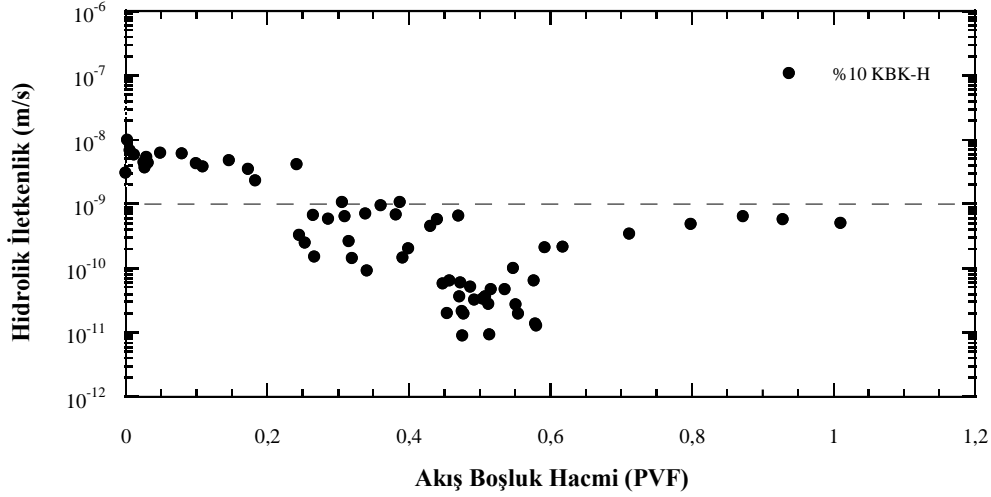
**Şekil 3.** KBK örneklerinin çıkış sularının Akış boşluk Hacmine göre Elektrik İletkenlik ve pH değerleri

**Figure 3.** Electrical conductivity and pH values of the outlet fluid of SBM with respect to pore volumes of flow

Hidrolik iletkenlik deney sonuçları ise Şekil 4'te sunulmuştur. Sızıntı suyu ile gerçekleşen deneyin başlarında bir azalış görülmüş olup ilerleyen zamanlarda dengeye geldiği belirlenmiştir. Son 5 deney verisinin ortalamasına göre KBK-H örneğinin hidrolik iletkenlik değeri  $5.10^{-10}$  m/s olarak ölçülmüştür. Belirlenen değer, sınır değer olan  $10^{-9}$  m/s değerinin altında olsa da kritik aşamada olduğu söylenebilir. Giriş bölümünde Şekil 1'de sunulmuş olan musluk suyu ile belirlenmiş hidrolik iletkenlik değerlerine bakıldığında %10 KBK örnekleri için ölçülen değerlerin  $2.10^{-10}$  m/s ile  $3.10^{-12}$  m/s arasında

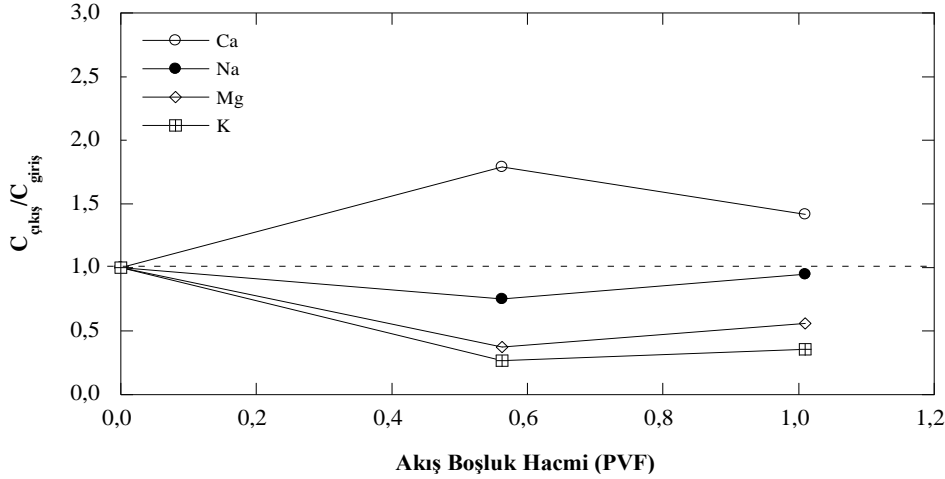
değiştiği görülmektedir. Ölçülen değerlerdeki farklılık, malzemelerin farklılığının yanı sıra aynı malzeme ve farklı başlangıç kompaksiyon su içeriklerinden de kaynaklanmaktadır. Bu çalışmadaki malzeme ve başlangıç kompaksiyon su içeriği (optimumun ıslak tarafı) ile benzer olan veri sonucu [26] karşılaştırıldığında sızıntı suyu ile gerçekleştirilen hidrolik iletkenlik deney sonucunda ölçülen değerlerin musluk suyu ile ölçülene göre artış gösterdiği belirlenmiştir. Sızıntı sularının kimyasının hidrolik iletkenliği arttırdığı görülmüştür





Şekil 4. Hidrolik iletkenlik deney sonuçları

Figure4. Hydraulic conductivity test results

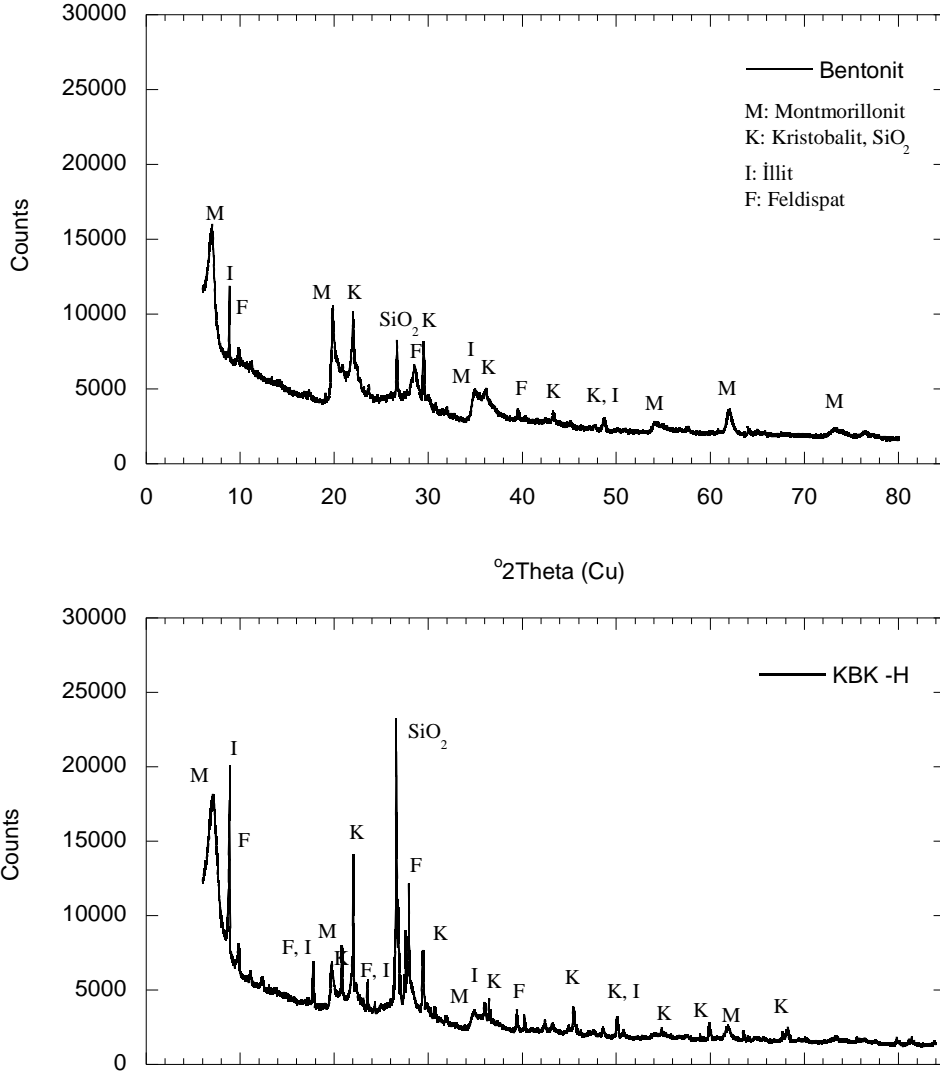


Şekil 5. Giriş ve çıkış sıvılarında bazı alkali ve toprak alkali metalleri konsantrasyonlarının oranı

Figure 5. Ratio of the outlet and inlet fluids concentrations for some alkali and alkaline earth elements

Harmandalı sızıntı suyu geçirilmiş %10 KBK örneğine ait çıkış sıvısı başlangıç sızıntı suyu ile karşılaştırılıp değerlendirildiğinde yaklaşık 0,6 akış boşluk hacmine kadar Ca hariç diğer alkali ve toprak alkali metallerin azaldığı, diğer bir deyişle KBK-H'nin bu iyonları bünyesinde tuttuğu ve Ca iyonunu ise bıraktığı görülmektedir (Şekil 5). Ca iyonu 0,6 akış boşluk hacmine kadar ciddi bir artış göstermiş ardından da hızlı bir azalma eğiliminde olmuştur. Diğer iyonlar için de 0,6 akış boşluk hacmine kadar, Ca iyonuna ters şekilde, bir azalma söz konusu iken bu orandan sonra artış gözlenmeye başlamıştır. Diğer bir deyişle %10 KBK-H örneği deneyin başından ortalarına kadar bünyesindeki Ca elementini bırakmış, sonrasında ise bu işlem tersine dönmüştür. KBK örneğinin önceki çalışmalarda musluk suyu ile belirlenen hidrolik iletkenlik değerlerine bakıldığında (Şekil 1) ortalama  $10^{-11}$  m/s civarında olduğu görülmektedir, bu çalışma ile aynı su içeriği ve sıkışma parametreleri ile sıkıştırılmış örneklerde ise musluk suyu ile belirlenmiş hidrolik iletkenlik değerinin  $10^{-12}$  m/s değerine kadar düştüğü görülmektedir. Sızıntı suyu geçirilmiş aynı başlangıç koşullarına sahip KBK-H'da ise hidrolik

iletkenlik değerinin artış göstererek  $10^{-9}$  m/s mertebelerine yaklaştığı görülmektedir. Bunun bir sebebi olarak yukarıda bahsi geçen  $Ca^{+2}$  ile  $Na^{+}$  iyonlarının yer değiştirmesi gösterilebilir. Bu örneğin hidrolik iletkenlik grafiğine (Şekil 4) bakılacak olursa yaklaşık 0,6 akış boşluk hacmine kadar azalma eğiliminde olan hidrolik iletkenlik değerinin 0,6 akış boşluk hacminden sonra arttığı görülecektir. Bu durum, sızıntı sularının karışık kimyası göz önüne alındığında elbette ki tek sebep olarak gösterilemez. Bununla beraber, iyon konsantrasyonunun artması ile hidrolik iletkenliğin de artması diğer çalışmalarda da gösterilmiştir [27-29]. Bunlara ek olarak pH 9 değerini geçtiğinde karışımdaki kilin mineralojik yapısının etkilenmiş olabileceğini de düşündürmektedir. Dolayısı ile, karışımın içerisindeki kilin sızıntı suyu geçirilmeden önceki ve sonraki mineralojik durumunu belirlemek üzere XRD analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 6'daki Bentonit etiketli grafik, kullanılan kile ait başlangıç koşulunu anlatmakta iken KBK-H etiketli grafik ise sızıntı suyu geçirilmiş örnekten elenen kile ait durumu anlatmaktadır.



Şekil 6. Başlangıç ve hidrolik iletkenlik deneyi sonrasındaki kile ait XRD grafikleri

Figure 6. The XRD graphics of clay before and after the hydraulic conductivity test

Şekil 6'da en çok dikkat çeken unsur montmorillonit piklerindeki azalış olmuştur. Hatta bazı piklerin yok olduğu da gözlenmiştir. Sızıntı suyu kimyasının kil mineralojisini değiştirdiği XRD grafiklerinden açıkça görülebilmektedir. XRD grafiklerindeki pikleri değerlendirirken, XRD için çözüm yapılan sistemin kütüphanesindeki mevcut kayıtlı bilgilere göre de değişiklik gösterebileceği unutulmamalıdır. K harfi ile gösterilen mineraller genel olarak kristobalit, kuvars ve SiO<sub>2</sub> içeriğidir ve bu içerikteki piklerde ciddi miktarda artış gözlenmiştir. KBK-H sonuçlarında illit mineralinin artışı da dikkat çekicidir. Killerdeki mineral yerleşimi, yüzey pozisyonu gibi pek çok etken XRD sonuçlarını etkilemektedir [30] fakat ilk bulgular açısından sızıntı suyuna maruz kalan montmorillonit mineralinin yapısının değiştiği görülmektedir. Bu durum, sızıntı suyu geçirilen örnekteki hidrolik iletkenlik değeri artışının açıklanmasına da katkıda bulunmaktadır. Bununla beraber, konu üzerine ayrıntılı çalışmaya da ihtiyaç olduğu açıktır.

Sonuç olarak, çalışmanın amacı olan KBK örneklerinin sızıntı suyu etkisi altında hidrolik iletkenlikleri tespit edilmiş ek olarak da bazı alkali ve toprak alkali metallerinin değişimi ve sızıntı suyunun kil mineralinin yapısına etkisi incelenmiştir. KBK'nın geçirimsiz tabaka olarak kullanımının bu çalışmada kullanılan sızıntı suyu için uygun olduğu görülmüştür.

#### 4. Sonuçlar

Kum bentonit karışımı üzerinde yakın yörelerden elde edilmiş bir sızıntı suyu için gerçekleştirilen hidrolik iletkenlik deney sonuçları sunulmuştur. Sızıntı sularının zemin ile etkileşimi sonucunda farklı kimyasal sonuçların elde edilmesi, her düzenli atık depolama sahasındaki karakteristik sızıntı suyuna göre geçirimsiz tabaka malzemesi seçiminin önemini vurgulamaktadır. Musluk suyu ile gerçekleştirilen deneylerin bir referans noktası olduğu unutulmamalı ve her uygulamaya özel geçirimsiz tabaka için önerilen malzemeler o bölgeye ait sızıntı suyu ile test edilmelidir. Pek çok saha uygulamasında kriter olarak musluk suyu ile gerçekleştirilen değerlerin alınması, kirlenmeye maruz kaldığında özelliğini kaybeden ya da kısmi olarak yitiren malzemeler için oldukça tehlikeli çevresel sonuçların doğurabileceğini göstermektedir.

Çalışma sonucunda elde edilen başlıca bulgular aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Ege Bölgesi'ndeki bir katı atık deposuna ait sızıntı suları incelenmiş ve bazı kimyasal özellikleri sunulmuştur.
- KBK'nın sızıntı suyu etkisi altındaki hidrolik iletkenlik değerleri, geçirimsiz tabakalar için kriter olan 10<sup>-9</sup> m/s değerini sağlamıştır. %10 KBK-H için final hidrolik iletkenlik

değeri  $5.10^{-10}$  m/s olmuştur. Bu süreç içinde de kilin mineralojik yapısında değişiklikler tespit edilmiştir.

- Sızıntı sularının giriş sıvılarının pH değerleri baziktir. Çıkış sıvılarının pH değerleri ise artarak yer yer 9'u geçmiştir. Bu pH ortamı kil zemin için uygun olan adsorpsiyon ortamına uzaktır. Bununla beraber,  $Na^+$  ve  $Ca^{+2}$  iyonlarının yer değiştirdiği belirlenmiştir.
- Hidrolik iletkenlik deneyleri bir akış boşluk hacmine ulaşınca sonlandırılmıştır dolayısı ile verilen sonuçlar uzun dönem değerlendirmesini içermemektedir.
- Deneysel süresinde örneklerde bakteriyel oluşuma rastlanmamıştır, uzun dönem analizlerinde bakteri oluşması ile hidrolik iletkenlik değerlerinde bir azalma beklenebilir. Gelecek çalışmalarda uzun dönem hidrolik iletkenlik değerleri araştırılabilir.
- Gelecek çalışmalar için sızıntı suyunun bentonite olan mineralojik etkisinin hangi koşullarda ve nasıl gerçekleştiği konusunun ayrıntılı olarak araştırılması da kuvvetle önerilmektedir.

### Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

### Teşekkür

Bu çalışma kısmen Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: 2018-060. Yazar, proje çalışanlarına hidrolik iletkenlik deneyinin gerçekleştirilmesi sırasında katkılarından dolayı teşekkür eder.

Yazar, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Götetik ABD'a sızıntı suyu temini katkısından dolayı teşekkür eder.

### Kaynaklar

- [1] Kraus, J.F., Benson, C.F., Erickson, A.E., Chamberlain, E.J. 1997. Freeze Thaw Cycling and Hydraulic Conductivity of Bentonitic Barriers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123 (3), 229-238.
- [2] Tay, Y.Y., Stewart, D.I., Cousens, T.W. 2001. Shrinkage And Desiccation Cracking in Bentonite-Sand Landfill Liners. *Engineering Geology*, 20 (1-4), 263-274.
- [3] Cho, W.-J., Lee, J.O. and Kang, C.-H. 2002. Hydraulic Conductivity of Compacted Soil-Bentonite Mixture for A Liner Material in Landfill Facilities. *Korean Society of Environmental Engineers*, 7 (3), 121-127.
- [4] Komine, H. 2004. Simplified Evaluation On Hydraulic Conductivities Of Sand-Bentonite Mixture Backfill. *Applied Clay Science*, 26 (1-4), 13-19.
- [5] Meer, S.R., Benson, C.H. 2007. Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners Exhumed from Landfill Final Covers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133 (5), 550-563.
- [6] Akgün, H. 2010. Geotechnical Characterization and Performance Assessment of Bentonite / Sand Mixtures for Underground Waste Repository Sealing. *Applied Clay Science*, 49 (4), 394-399.
- [7] Ören, A.H., Kaya, A., Kayalar, A.Ş. 2011. Hydraulic Conductivity of Zeolite Bentonite Mixtures in Comparison to Sand Bentonite Mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 48 (9), 1343-1353.
- [8] Akcanca, F., Aytakin, M. 2014. Impact of Wetting-Drying Cycles on The Hydraulic Conductivity of Liners Made of Lime-Stabilized Sand-Bentonite Mixtures for Sanitary Landfills. *Environmental Earth Sciences*, 72 (1), 59-66.
- [9] Varank, G., Demir, A., Adar, E., Bilgili, M.S., Top, S., Güvenç, Y.S., Özçoban, M.Ş. 2017. Investigation of Liner Systems in Transport of Organic And Inorganic Contaminants In Sanitary Landfill: A Case Study. *Celan - Soil, Air, Water*, 45 (1), 1-8.
- [10] Kleppe, J.H., Olson, R.E. 1985. Desiccation Cracking of Soil Barriers. ASTM, Special Technical Publication, 874, 263-275.
- [11] Hong, C.S., Shackelford, C.D. 2017. Long-Term Column Testing of Zeolite-Amended Backfills. I: Testing Methodology and Chemical Compatibility. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 143 (9), 04017050.
- [12] Bradshaw, S.L., Benson, C.H. 2013. Effect of Municipal Solid Waste Leachate on Hydraulic Conductivity And Exchange Complex Of Geosynthetic Clay Liners. *J. Geotech. Geoenviron.*, 140 (4), 1-17.
- [13] Benson, C.H., Chen, J.N., Edil, T.B., Likos, W.J. 2018. Hydraulic Conductivity of Compacted Soil Liners Permeated with Coal Combustion Product Leachates. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 144 (4), 1-15.
- [14] Adhikari, B., Dahal, K. R., Khanal, S.N. 2014. A Review of Factors Affecting the Composition of Municipal Solid Waste Landfill Leachate. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, 3 (5), 272-281.
- [15] Luo, H., Zeng, Y., Cheng, Y., He, D., Pan, X. 2020. Recent Advances in Municipal Landfill Leachate: A Review Focusing on Its Characteristics, Treatment and Toxicity Assessment. *Science of the Total Environment*, 703, 135468.
- [16] Bao, C., Jiaying, G., Huixin, Z. 2016. Alteration of Compacted GMZ Bentonite by Infiltration of Alkaline Solution. *Clay Minerals*, 51 (2), 237-247.
- [17] Xiang, G., Ye, W., Lv, L. 2019. Swelling Characteristics of Bentonite After Long-Term Dissolution in Alkaline Solution. *Clay Minerals*, 54 (4), 409-416.
- [18] Margat, J., Gun V.D.J. 2013. "Groundwater Around The World", CRC Press/Balkema.
- [19] Abdellah, D., Gueddouda, M.K., Goual, I., Souli, H., Ghembaza, M.S. 2020. Effect of Landfill Leachate on the Hydromechanical Behavior of Bentonite-Geomaterials Mixture. *Construction and Building Materials*, 234, 117356.
- [20] Tang, Q., Gu, F., Zhang, Y., Zhang, Y., Mo, J. 2018. Impact of Biological Clogging on The Barrier Performance of Landfill Liners. *Journal of Environmental Management*, 222, 44-53.
- [21] Chen, J., Qian, H., Yang, M., Qin, J., Qu, W. 2021. Effects Of Bacterial Activity on The Saturated Hydraulic Conductivity of Remolded Loess. *Engineering Geology*, 287, 106101.
- [22] Özçoban, M. Ş., Acarer, S., Tüfekci, N. 2022. Effect Of Solid Waste Landfill Leachate Contaminants on Hydraulic Conductivity of Landfill Liners. *Water Science and Technology*, 85 (5), 1581-1599.
- [23] Freeze, R.A., Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc., Englewoods Cliffs, N.J. ISBN: 0-13-365312-9, pp 624.
- [24] ASTM D 5084. 2016. Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using A Flexible Wall Permeameter. The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.
- [25] Uddin, M.K. 2017. A Review On The Adsorption of Heavy Metals By Clay Minerals, With Special Focus on The Past Decade. *Chemical Engineering Journal*, 308, 438-462.
- [26] Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Sarzanini, C., Mentasti, E. 2003. Adsorption of Heavy Metals on Na-montmorillonite. Effect of pH and Organic Substances. *Water Research*, 37 (7), 1619-1627.
- [27] Ören, A.H., Durukan, S., Kayalar, A.Ş. 2014. Influence of Compaction Water Content on The Hydraulic Conductivity of Sand-Bentonite And Zeolite-Bentonite Mixtures. *Clay Minerals*, 49(1), 109-121.
- [28] Shackelford, C.D., Benson, C.H., Katsumi, T., Edil, T.B., Lin, L. 2000. Evaluating The Hydraulic Conductivity of Gcls Permeated With Non-Standard Liquids. *Geotextiles and Geomembranes*, 18 (2-4), 133-161.
- [29] Yilmaz, G., Yetimoglu, T., Arasan, S. 2008. Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Liners Permeated with Inorganic Salt Solutions. *Waste Management and Research*, 26 (5), 464-473.
- [30] Emmanuel, E., Angraini, V., Asadi, A., Raghunandan, M.E. 2020. Interaction of Landfill Leachate with Olivine-Treated Marine Clay: Suitability For Bottom Liner Application. *Environmental Technology and Innovation*, 17, 100574.
- [31] Zhou, X., Liu, D., Bu, H., Deng, L., Liu, H., Yuan, P. 2018. XRD-based quantitative analysis of clay minerals using reference intensity ratios , mineral intensity factors, Rietveld, and full pattern summation methods : A critical review. *Solid Earth Sci.* 3, 16-29.



## Regional Flood Frequency Analysis of Northern Iran

### Kuzey İran'ın Bölgesel Taşkın Frekans Analizi

Maryam Adhami 

Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran  
 Corresponding Author / Sorumlu Yazar \*: m.adhami66@yahoo.com

#### Abstract

The combination of the L-moment approach and multiple regression offers an attractive solution to provide flood estimation at ungauged sites within the Gorganrood and Ghare-sou river basins in the north of Iran. This research has two main goals including regionalization by cluster analysis and regional estimation of flood quantile at the site of interest. After data analysis regarding climatic and hydrologic data series, hierarchical approach was carried out to identify homogeneous regions. The homogeneity test was done by H-Statistic, a testing method based on L-moments. The results showed that a subdivision of selected watersheds into homogenous groups is necessary; therefore, two homogenous regions were formed. In the present study, five three-parameter distributions were fitted to the homogeneous regions and the best-fit one was identified using the L-moments approach. The results of the goodness-of-fit analysis for the two regions introduced the Generalized Pareto (GPA) distribution for both regions as acceptably close fits to the regional average L-moments. Besides, multiple regression was applied to diagnose the effective independent parameters on discharge value. The results reported percent of permeable formations, average annual precipitation, and stream slope as the most effective variables.

**Keywords:** Clustering, Gorganrood and Ghare-sou, L-moments, Principal component analysis, Regional flood frequency analyses, Regionalization

#### Öz

L-moment yaklaşımı ve çoklu regresyonun kombinasyonu, İran'ın kuzeyindeki Gorganrood ve Ghare-sou nehri havzalarındaki ölçüm olmayan alanlarda taşkın tahmin etmek için cazip bir çözüm sunmaktadır. Bu araştırma, kümeleme analizi ile çalışma alanının bölgeselleştirilmesi ve taşkın kuantillerinin bölgesel tahmini olmak üzere iki ana amaca yöneliktir. Verilerin analizinden sonra homojen bölgeleri belirlemek için hiyerarşik bir yaklaşım gerçekleştirilmiştir. Homojenlik testi, L-momentlerine dayalı bir test yöntemi olan H-Statistic ile yapılmıştır. Sonuçlar, seçilen havzaların homojen gruplara bölünmesinin gerekli olduğunu göstermiştir; dolayısıyla iki homojen bölge oluşmuştur. Bu çalışmada, homojen bölgelerde beş adet üç parametrelili dağılımın uyumluluğu incelenmiş ve en uygun dağılım L-momentler yaklaşımı kullanılarak belirlenmiştir. İki bölge için uyumluluk analizinin sonuçları, her iki bölge için de Generalized Pareto (GPA) dağılımını, bölgesel ortalama L-momentlerine kabul edilebilir ölçüde yakın olduğunu göstermiştir. Ayrıca debi üzerindeki etkili bağımsız değişkenlerin tespiti için çoklu regresyon uygulanmıştır. Sonuçlar geçirgen formasyonların yüzdesi, yıllık ortalama sıcaklık ve akarsu eğiminin en etkili değişkenler olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Kümelendirme, Gorganrood ve Ghare-sou, L-moments, Temel bileşenler Analizi, Bölgesel taşkın frekansı analizi, Bölgeselleştirme

#### 1. Introduction

Flood frequency analysis performs the estimation of the return period and flood magnitude [1]. This process is often essential for the design of hydraulic structures such as dams and bridges, and for hydrological applications such as dam safety analyses and reservoir management. This information is required at watersheds where stream flow measurements are not long enough to provide a precise calculation of the flood magnitude, frequency distribution, and the long return periods estimation of flood, or where there is no data at all [2]. In arid and semi-arid regions flood frequency analysis is encountering data and information shortage issues. Especially, in these regions, the reliable estimate is not possible due to short records [3]. Arid and semi-arid climatic condition covers more than 75% of Iran where despite the low annual precipitation, large floods occur sometimes. Using records from a similar region regarding flood behavior is an important and practical way to provide more information, rather than only at-site data [4].

On the other hand, geomorphologic and hydrologic parameters with characteristics of the watersheds are necessary to enable better planning and conducting the proper strategies for management practices [5]. Developed strategies could be implemented in a prioritized manner, due to the involvement of huge investment. Toward this aim, it is expected to rehabilitate the watershed (s) systematically and sustainably [6]. Scholars in related fields have claimed that regionalization of watersheds is essential to develop regional flood flow equations which would be used to estimate the magnitudes of flood at locations that suffer from actual flood data shortage. Regional flood frequency analysis provides a solution to such a problem and has widely been used [4, 7-11]. The analysis uses spatial data to compensate for the lack of temporal data, accomplished in a region with similar flood behavior. The background assumption is that flood data regarding the homogeneous region without considering a scaling factor are calculated from the same frequency distribution. The method involves two major steps; the first one is the identification of homogeneous watersheds from the

hydrological perspective, which is performable by selecting gauging stations that constitute a region with sufficient homogeneity of flow characteristics. The second step forms calculating regional equations for each group [12]. The homogeneous regions were simply defined according to the geographic proximity of the different watersheds. A significant necessity for regional flood frequency analysis is the delineation of the region used for the flow information transfer. A region, in this perspective, is considered a collection of watersheds that are similar in terms of watersheds hydrologic behavior, not necessarily geographically adjacent. This step is the most challenging but important step in regional flood frequency analysis. Various regionalization techniques have been developed by researchers for the determination of homogeneous regions [7, 13-21]. Hierarchical Agglomerative Clustering has become a popular tool for regional distribution identification, and testing of outlier stations [22-27]. Tasker and Thomas (1978) applied geographical regionalization method in Arkansas [22]. Regional equations regarding 4 regions have been presented. Acreman and Sinclair (1986) used Ward's method for the selection of parent distribution to fit extreme streamflow data of some sites in Scotland [23]. Between five homogeneous regions just one group could not show the discharge variations. Stamy and Hess (1993) carried out a regional flow frequency analysis in Florida and Georgia in America using Ward's method [24]. They classified the study area in four groups. All four groups have presented significant results. Kjeldsen and Smithers (2002) also investigated the spatial variation and regional frequency distribution for KwaZulu-Natal provinces, South Africa, using the index-flood method. According to the results, two clusters were distinguished [25]. Farsadnia et al. (2014) applied a two-level Self-Organization Feature Map (SOM) and three clustering methods (fuzzy c-mean, K-mean, and Ward's Agglomerative hierarchical clustering) to identify hydrologically homogeneous regions in Mazandaran province of Iran [26]. Unified distance matrix algorithm and mentioned clustering methods formed regions for flood frequency analysis. Four regions were achieved using a heterogeneity test. The results suggested that the combination of SOM and Ward is much better than the combination of either SOM or fuzzy c-mean and K-mean. Calegario et al. (2020) conducted regionalization to identify Hydrologically Homogeneous Regions (HHRs) in the Doce River basin [27]. Grouping was done based on geographical convenience methods and cluster analysis. Six statistical indices were used to assess regionalized flows. It was concluded that such a physical analysis reduced the subjectivity in the identification of HHRs.

The essence of the regionalization process is to define similar watersheds to ensure extreme flow information transfer of sites within the region. The main objectives of this paper are summarized in three steps, the first one is to determine the homogeneous regions, the second one is to estimate regionalized parameters, and the last one is calculating the best equations for each region in different period return time in Gorganrood and Ghare-sou watersheds, Golestan province of Iran.

**2. Material and Method**

This phase involves four main stages: (i). screening the data and determining the main site and at-site characteristics that affect the flood magnitude and applying them in the regionalization of the study area, (ii). identifying homogeneous regions by cluster analysis and region of-influence methods, testing the homogeneity of regions, (iii). investigating the best-fit distribution for the study area based on L-moments approaches

and (iv). calculating estimation equations for each region by multiple regression.

**2.1. Study area**

The Gorganrood and Ghare-sou Rivers originate from the Gorgan plate and flow into the Khazar Sea. The rivers have a drainage area of 11786 km<sup>2</sup>, and a mean annual temperature of 17° C. Most of the basin's area is humid or semi-humid with a mean annual precipitation of 750 mm. The length of the Ghare-Sou and Gorganrood rivers are 160 and 300 km, respectively. All streams flowing through study watersheds have a constant regime. The mean annual discharge of the streams ranges among 0.32-12.54 m<sup>3</sup>/s. Figure 1 represents the location of the study area and flow gauging stations.

**2.2. Selection of the stations**

Some important criteria named record length, number of missing data, location of the station, watershed size, and regulation level were considered for station selection. Data series were screened to ensure they include no more missing data. Stations on sub-watersheds with major dams or reservoirs were excluded since discharge magnitude can be greatly affected by regulation in rivers [28-29]. All 17 selected hydrometric stations have 24 years or more of discharge data and are appropriate for study. Daily discharge series measured at the gauging stations were used for this study. In cases with abnormal data, they were supposed outliers, and Grubbs-Beck method was applied to verify them (30). Besides, regression method was used to fill in missing data in the time series of selected watersheds. Some statistical features related to study sub-watersheds discharge values are summarized in Table 1.

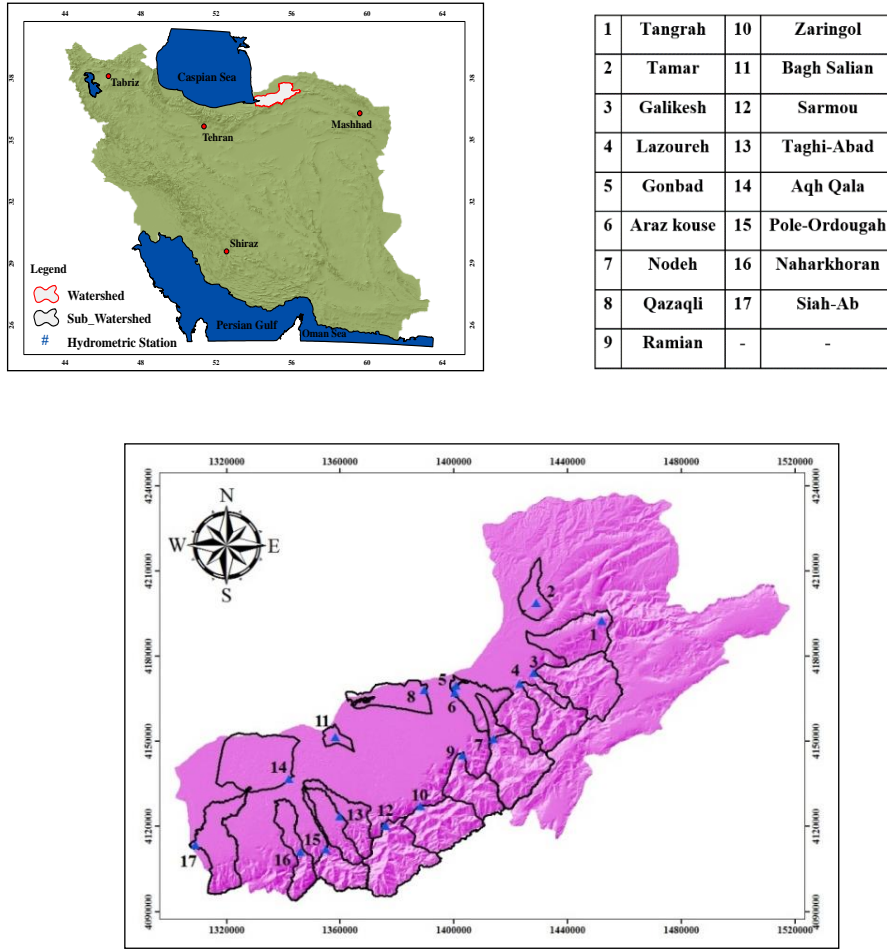
**Table 1.** Statistical features of study station's discharge

Sub-watershed	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation	Skewness coefficient
Tangrah	0.31	10.39	1.94	1.93	3.88
Tamar	0.81	3.91	1.67	0.66	2.08
Galikesh	1.31	3.95	2.48	0.75	0.38
Gonbad	2.58	14.48	7.36	3.17	0.71
Lazoureh	1.01	3.96	2.09	0.69	0.90
Araz kouse	2.26	9.08	5.46	1.60	0.44
Bagh Salian	0.23	6.90	3.00	1.79	0.61
Taghi-Abad	0.09	0.85	0.43	0.19	0.30
Agh Qala	0.68	23.03	11.73	6.62	0.27
Naharkhoran	0.13	0.71	0.32	0.15	1.00
Siah-Ab	0.21	4.75	2.03	1.01	0.58
Pole-Ordougah	0.17	0.90	0.49	0.20	0.22
Sarmou	0.36	2.48	1.11	0.58	0.94

**2.3. Independent parameters**

A Geographical Information System (GIS) database was created to retrieve land cover, topography, soil types, and land use, deposition of sediments, and water resources. Watershed attributes were chosen based on their availability and the previous studies on national projects (31-32). These attributes could facilitate the deterioration of the watershed, if do not have a suitable level [30]. Several layers of spatial information about elevation, land cover, soil type, and climate were integrated to retrieve watershed characteristics. Some small watersheds that were not included in these reference layers were manually delineated using a Digital Elevation Model (DEM) at a small scale. DEM at a resolution of 5 meters was used for elevation and slope data. Climate data were obtained from synoptic stations' measured data.





**Figure1.** The geographical location of Gorganrood and Ghare-sou watersheds Golestan province, Iran

Synoptic stations with 30 years (or more) of data were selected. Several climate parameters such as De-Martonne coefficient, mean annual precipitation and mean annual temperature were computed. All casework parameters (taken from the Natural Resource Administration of Gorgan) are arranged in Table 2.

**2.4. Principal Component Analysis (PCA)**

Principal Component Analysis (PCA) is a multivariate technique that contains approaches that consider all the variables at the same time. Such approaches focus on the relationships among variables with the individual characteristics of each one [33-34]. PCA was used to treat stream discharge data from 17 stations analyzed for 30 variables in the Gorganrood and Ghare-sou watersheds, North of Iran. The results have identified the effective parameters on stream flow peaks and the variables that were not contributing to these streams' discharge.

In the first step, the covariance matrix is calculated. If X in a matrix format is the original dataset, which embraces m rows (different measurements of a specific attribute) and n columns (which represent the attributes), the covariance matrix  $C_X$  will be:

$$C_X = \frac{1}{n} X X^T \tag{1}$$

Where  $X^T$  is a transpose matrix of X. Afterward, eigenvectors and eigenvalues are computed. The eigenvector  $\vec{v}$  is defined as:

$$C_X \vec{v} = \lambda \vec{v} \tag{2}$$

Where  $\lambda$  is a scalar value, i.e., the eigenvalue. The below equations clarify the steps to solve for eigenvalue and eigenvector:

$$C_X \vec{v} - \lambda \vec{v} = 0 \tag{3}$$

$$\vec{V}(C_X - \lambda I) = 0 \tag{4}$$

$$\text{Det}(C_X - \lambda I) = 0 \tag{5}$$

Where I is the identity matrix of the same dimension as  $C_X$ . Consequently, each eigenvector is produced by each  $\lambda$  times  $\vec{v}$  which is called the principal component. The dimension of the dataset is equal to the number of principal components. The number of PCs is usually based on the number of eigenvalues greater than 1. The ratio between the sum of the eigenvalues and the eigenvalue of a component shows the percent of the variance in the original dataset represented by that component [35].

**2.5. Regionalization method**

Cluster Analysis (CA) assembles objects based on their characteristics and contains a group of multivariate techniques whose primary purpose is to find out objects' common features [36]. Cluster analysis classifies objects based on similarity among them based on a predetermined selection criterion. The final groups should contain objects with high internal homogeneity and high external heterogeneity. Hierarchical agglomerative clustering is known as the most popular method and acts in a manner to find intuitive similarity relations among a single

sample and whole data set, and provides a dendrogram (tree diagram) [37]. Cluster analysis performs in two ways: model-oriented and distance-oriented [38]. Presently, distance-oriented methods are preferred because unlike the model-based methods, these methods do not take into account the statistical distribution of the data and also do not estimate the parameters of the statistical distribution along with the hidden variable (which is used as the label of the clusters in the introduced model). They are also easy to use and precious in clustering. These methods

themselves are classified into two groups: chance models and ordinal ones. Ordinal models are frequently used in comparison with chance models. Ordinal models start with groups whose number is equal to the number of parameters. In other words, there is only one parameter in every single group. In the next step, the more similar groups join together. In the following, these groups join other similar groups. Finally, only one group exists that includes all parameters [39]. In the present study Ward's method as one of the hierarchical clustering approaches is used.

**Table 2.** Independent parameters of Gorganrood and Ghare-sou watersheds in Golestan province, Iran

Sub-watersheds	Taghi-Abad	Galkesh	Lazoureh	Pole-OrdOugah	Gonbad	Tangrah	Bagh Salian	Naharkhoran	Agh Qala	Siakh-Ab	Tamar	Sarmou	Araz kouse
Min-e (m)	-54	-80	200	0	17	100	38	0	-93	-52	80	500	17
Max-e (m)	2538	70	2500	3100	52	1800	-94	3000	85	2612	670	3600	2878
L (km)	34.38	35.28	26.73	41.76	4.89	29.87	12.72	35.91	32.56	39.59	21.88	29.69	47.28
P (km)	127.14	147.16	86.26	145.21	14.97	87.96	34.39	129.25	87.29	164.81	58.24	87.96	205.53
A (km <sup>2</sup> )	194.13	264.81	260.80	215.15	95.35	305.55	119.6	212.88	458.93	345.76	122.75	302.40	78.1
G-co	0.092	0.078	0.047	0.09	0.2	0.04	0.1	0.085	0.026	0.066	0.066	0.12	0.05
S-L (km)	34.98	36.21	25.77	35.15	5.11	34.22	12.82	44.04	37.15	43.5	17.59	28.4	78.5
S-S (%)	6.22	0.12	5.9	7.93	0.14	1.33	0.19	7.66	0.05	4.2	1.00	10.92	4.84
Tc (h)	2.98	13.96	2.41	6.32	2.91	5.32	5.25	3.29	19.98	4.11	3.54	2.05	6.13
V (m/s)	3.26	0.72	2.97	0.66	0.49	1.79	0.68	3.72	0.52	2.94	1.38	3.85	3.56
B-S (%)	21.38	3.31	37.6	55.85	9.04	9.09	3.82	13.46	1.37	4.42	5.71	18.95	30.65
P-A (km <sup>2</sup> )	52.31	151.78	72.72	72.46	6.15	128.66	14.52	66.71	453.38	133.58	47.17	7.24	35.75
N-A (km <sup>2</sup> )	56	37.15	62.2	0	1.24	73.02	11.51	55.69	1.2	67.78	29.21	31	6.29
S-A (km <sup>2</sup> )	13.47	28.91	49.56	31.8	0.88	17.95	9.65	55.72	0.01	57.62	15.59	6.49	13.59
E-A (km <sup>2</sup> )	7.11	32.21	39	53.34	1.01	57.05	8.77	21.01	0.001	39.86	22.42	45.89	18.93
W-A (km <sup>2</sup> )	65.91	14.42	31.17	55.74	0.25	16.16	3.4	10.39	5.51	133.58	8.36	17.4	36.33
D-d1 (km/km <sup>2</sup> )	0.34	0.27	0.23	0.26	0.19	0.3	0	0.32	0.29	0.4	0.62	0.56	0.12
D-d2 (km/km <sup>2</sup> )	0.26	0.16	0	0.11	0.69	0.14	0	0.14	0.15	0.15	0.32	0.32	0
D-d3 (km/km <sup>2</sup> )	0.06	0.05	0	0.06	0.23	0.03	0	0.17	0.08	0.09	0.19	0.14	0
D-d4 (km/km <sup>2</sup> )	0.01	0	0	0	0.05	0.05	0	0	0	0.03	0.05	0.11	0
TD_d (km/km <sup>2</sup> )	0.66	0.49	0.23	0.42	1.17	0.52	0.07	0.64	0.52	0.66	1.17	1.13	0.12
F (km)	1.69	166.82	4.16	0.42	1.2	1.07	1.33	25	12.66	7.14	7.56	10	6.38
Ra (km)	80.39	0.5	109.32	46.68	8.34	115.89	42.57	22.1	332.62	244.87	107.66	42	189.2
Ag (km)	0	97.49	0.2	0	0	0	3.95	14	113.66	0.16	4.79	0.15	132.43
OT (km)	112.05	0	142.26	168.05	0	188.6	0	150	0	93.53	2.74	50	249.69
P-F (%)	4.34	5.47	1.82	42.65	3.48	0.29	10.94	13.57	53.99	2.35	8.92	0.25	3.93
C-F (%)	4.37	27.08	4.76	2.24	33.9	1.44	7.14	8.75	10.85	0.21	29.44	36.92	17.98
D-C	8.62	7.13	5.55	6.04	7	6	8.21	8.26	9.2	9.68	6	5.4	6.00
A-T (°c)	16	17	13	13	17	15	17	15	17	17	17	9	13
A-P (mm)	580.11	815.08	873.35	370.36	456.82	772.54	379.04	743.56	418.94	539.34	582.42	778.93	449.99

Min-e: minimum elevation, Max-e: maximum elevation, L: length, P: perimeter, A: area, G-co: Gravelius coefficient, S-L: stream's length, S-S: stream slope, Tc: concentration time, V: velocity of flow, B-S: basin's slope, P-A: area of the pediment, N-A: north land's area, S-A: south land's area, E-A: east land's area, W-A: west land's area, D-d1,2,3,4: 1,2,3 and 4 ranked stream's density. TD-d: total density drainage, F: forest's area, Ra: ranches' area, Ag: agriculture field's area, OT: other land uses area, P-F: Percentage of permeable formations, C-F: carbonic bed rocks (namely percentage of impermeable formations), D-C: Demarten coefficient, A-T: annual average temperature, A-P: average annual precipitation.

Based on the rules of mentioned method, grouping is done based on intra-group minimum and inter-group maximum variance [40-41]. Ward's algorithm [42] is one of the common regionalization techniques in climatology and hydrology fields [16, 23, 43-47]. This method acts based on the assumption that information loss or alteration of the value of the objective function that occurs in cluster merging depends only on the relationship between the two merged clusters and is independent of the relationships with any other clusters.

**2.6. Cluster validation indices**

There are several methods to determine the heterogeneity in cluster analysis; one of them is L-moment. Hosking (1990) introduced L-moments, which are linear combinations of Probability Weighted Moments (PWMs) and can be directly interpreted as the shape of probability distributions and scale measures [48]. Vogel and Fennessey (1993) clarified the advantages of L-moments compared with conventional moments [49]. L-moments and L-moment ratios are the basic concepts for all L-moments steps such as; the homogeneity test, discrimination of heterogeneous regions (discordancy test), best distribution determination for each cluster, and the estimation of parameters (location (n), scale (r), and shape (k)) for selected distributions [4]. According to Hosking and Wallis (1997), if a region has N watersheds, for basin i,  $D_i$  as the measure of discordancy is computable as the following equation [16]:

$$D_i = \frac{1}{3} N(u_i - \bar{u})^T A^{-1} (u_i - \bar{u}) \tag{6}$$

Where  $u_i$  is a vector containing the L-moment ratios for basin i,  $\bar{u}$  is the unweighted regional average for  $u_i$  and A is the matrix of sums of squares and cross products. For each data set is determined critical value. If the  $D_i$  value regarding any station placed in the cluster is less than the critical value, the cluster is homogeneous, otherwise, the heterogeneous stations should be removed from the cluster.

**2.7. Best-fit distribution**

Statistical tests are required to confirm the appropriateness of the chosen distribution which provides a certain degree of confidence. A test based on the Monte Carlo simulation described by Hosking and Wallis (1993, 1997) is used for this aim [16, 50]. Five statistical distributions are used that include Gen. logistic (GLO), Gen. Extreme value (GEV), Gen. Normal (GNO), Pearson type III (PE3), and Gen. Pareto (GPA). The goodness-of-fit measure for each distribution is given by:

$$Z^{DIST} = (\tau_4^{DIST} - \tau_4^R + B_4) / \sigma_4 \tag{7}$$

Where  $\tau_4^{DIST}$  is the theoretical L-Kurtosis coefficient of the candidate probability distribution.  $\tau_4^R$  is the L-moment ratio and  $B_4$  is the bias of  $\tau_4^R$  and  $\sigma_4$  is the standard deviation of  $\tau_4^R$ . A distribution could be declared as fitting satisfactorily if  $|Z^{DIST}| \leq 1.64$  [50].

**2.8. Multiple regression method**

The most commonly used relation between the flow statistics (represented here by the flood-quantile  $Q_T$  of return period T years) and the watershed characteristics (A, B, . . . M) is the power-form function [48]. The multiple regression model can be expressed in the following form:

$$Q_T = \alpha A^a B^b C^c \dots M^m \tag{8}$$

Where  $\alpha$  is the regression constant and a, b, c, . . . , m are regression coefficients described by regression analysis. linear regression resulting from the logarithms of the variables provides multiple regression. Final multiple regression was applied to estimate flood discharge for given frequencies and watershed characteristics in relation to the homogeneous regions. The multiple regression technique facilitates flood peak magnitude determination in ungauged locations by transferring flood characteristics from similar sites where measured data are available. The relation is presented by flood-frequency equations [52]. The regression equations try to connect the most impressive watershed characteristics (independent variables) to flood characteristics (dependent variables;  $Q_2, Q_5, \dots, Q_{200}$ ).

**3. Results and discussion**

**3.1. Determination of effective independent parameters**

Due to the fact that the first stage of regional frequency analysis is a close inspection of the data, statistical analysis seems essential. Gross errors and inconsistencies should be eliminated. Toward this aim, a check was accomplished, and based on the results the data were homogeneous (stationary) over time. All 17 sub-basins of the Gorganrood and Ghare-sou watersheds have been tested with different indices. Among them, one stations' data showed autocorrelation detected by the Autocorrelation Function Test (ACF). Additionally, three series failed Kendal's test. 13 sub-watersheds have remained for classification. 30 independent parameters were calculated and screened with PCA. All parameters are placed in 6 components that have similar effects on stream discharge. In each group, the most important one was selected as a component representative according to its variance (Red circles in Table 3). The results are arranged in Table 3. The six components allocated 91.87% of the total variance to themselves so all of them were used to determine effective variables.

**3.2. Identification of homogeneous regions**

Cluster analysis is a standard method of statistical multivariate analysis for dividing a data set into groups and has been frequently used to unify regions for regional analysis context. Regionalization methods such as cluster analysis need to select effective variables through similarity definition (or dissimilarity) for the watersheds [15]. Hosking and Wallis (1997) recommended methods that use watershed characteristics only for homogeneous region identification. Consequently, the use of watershed characteristics to conduct independent tests of the proposed regions is asked [16]. They believe Ward's method as a kind of hierarchical clustering method due to minimizing the Euclidean distance of characteristics space in each cluster is a powerful approach. In this study, Ward's clustering method was chosen for homogeneous regions determination (Fig. 2). At the next step, the L-moment test was accomplished to test the heterogeneity of the clusters.

The total area of 13 selected sites is 4784.663 km<sup>2</sup>. The identified homogeneous regions (1) and (2) include 2673.81 and 302.4 km<sup>2</sup>, respectively. All of the sub-basins except Sarmou located in region (1), and region (2) included just the Sarmou sub-basin. Among the 13 studied sub-watersheds, Sarmou sub-basin has the highest elevation values (minimum elevation of 500 meters and maximum elevation of 3600 meters). On the other hand, the mentioned area has the highest slope of the main stream, i.e. 10.92%. Due to its high elevation and slope magnitude, it has the lowest concentration time of 2.05 hours and has the highest flow speed of 3.85 m/s. The obvious difference between this sub-watershed and the other studied sub-watersheds in terms of

topography and geology (possess the lowest percentage of permeable formations that is 0.25%) is the main reason for being heterogenous and forming a separate cluster

**Table 3.** The result of the Principal Component Analysis

Parameters	1 <sup>st</sup> Component	2 <sup>nd</sup> Component	3 <sup>rd</sup> Component	4 <sup>th</sup> Component	5 <sup>th</sup> Component	6 <sup>th</sup> Component
Min-e	-0.1	-0.24	0.13	-0.2	0.17	-0.08
Max-e	0.41	0.07	0.65	-0.41	-0.12	0.09
L	0.45	0.12	0.23	0.18	-0.33	-0.17
P	0.46	0.08	0.04	-0.10	-0.20	0.07
A	-0.47	-0.14	0.10	0.3	-0.03	-0.03
G-c	-0.44	0.36	-0.06	-0.55	0.54	0.35
S-L	-0.4	-0.28	0.18	0.02	0.09	-0.20
S-S	0.57	0.21	0.46	0.01	-0.08	0.15
T <sub>c</sub>	-0.37	0.39	-0.05	-0.35	-0.17	-0.03
V	0.45	0.03	0.36	-0.42	-0.13	0.09
B-S	0.05	-0.41	0.36	-0.1	0.37	-0.30
P-A	0.52	-0.03	-0.34	0.55	-0.32	-0.31
N-A	0.4	0.09	-0.27	-0.2	0.16	0.22
S-A	0.28	0.35	0.49	0.12	-0.08	-0.27
E-A	0.34	-0.13	-0.23	-0.01	-0.07	0.09
W-A	0.12	-0.45	0.78	-0.04	0.15	0.19
D-d1	-0.24	0.18	0.08	-0.10	0.56	0.24
D-d2	-0.36	0.23	0.12	-0.02	0.53	0.26
D-d3	-0.08	-0.18	0.08	-0.14	0.51	-0.29
D-d4	-0.32	-0.2	0.52	-0.16	0.56	-0.07
TD-d	0.28	0.07	-0.38	0.15	-0.30	-0.64
P-F	0.19	0.19	0.33	-0.56	-0.06	-0.32
C-F	-0.43	-0.43	-0.42	0.31	0.21	0.02
F	-0.41	-0.41	0.19	0.15	-0.62	-0.19
Ra	0.12	0.12	-0.01	0.12	0.05	-0.41
Ag	-0.10	-0.10	-0.21	-0.34	-0.43	0.23
OT	0.4	0.4	0.24	0.49	0.1	-0.18
A-T	-0.17	-0.17	-0.93	0.21	0.11	-0.08
D-C	-0.13	-0.13	-0.65	-0.18	0.05	0.45
A-P	-0.02	-0.02	0.50	0.39	-0.31	0.27
Eigenvalue	3.79	2.37	1.91	1.55	0.85	0.56
% of variance	31.56	19.73	15.88	12.96	7.05	4.68
Cum. % of variance	31.56	51.29	67.19	80.13	87.19	91.87

Min-e: minimum elevation, Max-e: maximum elevation, L: length, P: perimeter, A: area, G-co: Gravelius coefficient, S-L: stream's length, S-S: stream slope, T<sub>c</sub>: concentration time, V: velocity of flow, B-S: basin's slope, P-A: area of the pediment, N-A: north land's area, S-A: south land's area, E-A: east land's area, W-A: west land's area, D-d1,2,3,4: 1,2,3 and 4 ranked stream's density. TD-d: total density drainage, F: forest's area, Ra: ranches' area, Ag: agriculture field's area, OT: other land uses area, P-F: Percentage of permeable formations, C-F: carbonic bed rocks (namely percentage of impermeable formations), D-C: Demarten coefficient, A-T: annual average temperature, A-D: average annual discharge A-P: average annual precipitation.

**3.3. Homogeneity of the clusters**

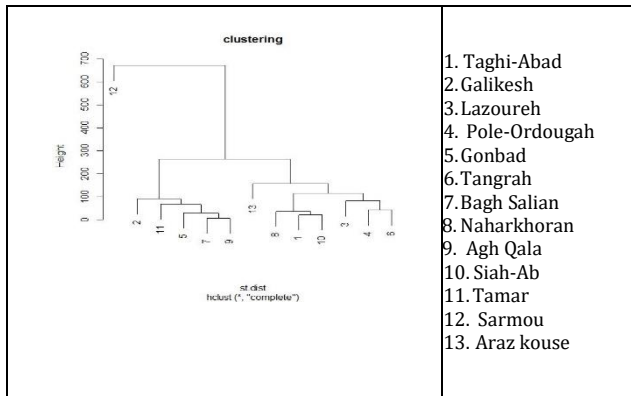
As mentioned in the methodology section, L-moment is used to determine the homogeneity of groups. In the current study, discordancy values were measured and H was used to determine the heterogeneity. H-statistic is a statistical test based on L-moment ratios.  $H < 1$  indicates that the region is acceptably homogeneous;  $1 < H < 2$  means possibly heterogeneous, and  $H > 2$  emphasizes definitely heterogeneous situations. The results show that the absolute values of the H-statistic for both clusters are less than 1, and these regions are acceptably homogeneous.

The discordancy values regarding study clusters are presented in Table 4.

**3.4. Identification of the best-fit distribution**

This section includes the results of parameter estimation and the best-fit distribution test. In the L-moments approach, the location, scale, and shape parameters of five commonly used distributions in regional flood frequency analysis are calculated by the averages of the L-moments and L-moment ratios in homogeneous regions. The Z-statistic as a goodness-of-fit index was used for the identification of regional distribution applied in

each region. As it is obvious in Table 5 the GPA presents the best goodness-of-fit at regions (1) and (2).



**Figure 2.** Dendrogram of clustered watersheds using Ward's method

**Table 4.** The discordancy values regarding study clusters

Cluster	Sub-watersheds	Discordancy Coefficient	Threshold limit of heterogeneity coefficient	H-Statistic
1	Galikesh	1.01	3.00	0.98
	Tamar	1.30		
	Gonbad	1.10		
	Bagh Salian	0.80		
	Agh Qala	1.20		
	Araz kouse	0.89		
	Naharkhoran	1.09		
	Taghi-Abad	0.94		
	Siah-Ab	1.78		
	Lazoureh	0.85		
	Pole-Ordougah	1.00		
2	Tangrah	1.00	1.33	0.73
	Sarmou			

The Z value of this distribution is the lowest value of the Z-statistic (less than 1.64), as a result, the GPA could be introduced as the best-fit distribution for the flood analysis at the region (1) and (2). The values of the Z-statistic indicate that the GPA for the regions (1) and (2) gives close fits to the L-moments' regional average. The results are shown in Table 5.

**Table 5.** Goodness-of-fit analysis (ZDIST) for five different frequency distributions in the homogeneous regions.

Distribution	Homogenous region	
	Cluster 1	Cluster 2
GLO	0.25	1.51
GEV	-1.55	0.68
GPA	-5.39	-1.1
GNO	-1.63	0.64
PE3	-2.04	0.45

**3.5. Multiple-regression results**

The aim is to achieve a relationship between the dependent variable (QT) and independent variables (watershed characteristics) in each homogeneous region. The parameters of GPA distribution i.e. location (n), scale (a), and shape (k) were calculated for each homogeneous region by direct use of the data. Mentioned parameters are essential for QT estimation. The predicted flood values of the 2, 5, 10, 25, 50, 100, and 200 years were calculated for each site. The results are presented in Tables 6 and 7.

**Table 6.** The predicted flood magnitudes (m<sup>3</sup>/s) by GPA in the cluster (1)

Sub-watershed	Return period (T), year						
	2	5	10	25	50	100	200
Sarmou	1.134	1.483	1.660	1.818	1.899	1.956	1.996

**Table 7.** The predicted flood magnitudes (m<sup>3</sup>/s) by GPA in the cluster (2)

Sub-watersheds	Return Period (T), year						
	2	5	10	25	50	100	200
Tangrah	1.79	2.69	3.15	3.55	3.76	3.91	4.01
Tamar	1.54	2.31	2.70	3.05	3.23	3.36	3.45
Galikesh	2.29	3.45	4.03	4.55	4.82	5.00	5.14
Gonbad	6.81	10.23	11.96	13.50	14.29	14.84	15.24
Lazoureh	1.93	2.90	3.40	3.84	4.06	4.22	4.33
Araz kouse	5.05	7.59	8.87	10.02	10.60	11.02	11.31
Bagh Salian	2.78	4.17	4.88	5.51	5.83	6.06	6.22
Taghi-Abad	0.39	0.59	0.69	0.78	0.83	0.86	0.89
Agh Qala	10.87	16.31	19.08	21.54	22.79	23.68	24.31
Naharkhoran	0.30	0.45	0.52	0.59	0.62	0.653	0.67
Siah-Ab	1.88	2.82	3.30	3.73	3.94	4.10	4.21
Pole-Ordougah	0.45	0.68	0.79	0.89	0.95	0.98	1.01

The relation among discharges of selected recurrence intervals of the basin and independent parameters is determined by multiple-regression method. Output variables from PCA are entered into the multivariate regression model, but only several variables will be entered in the text of the final model. The coefficient related to each variable expresses the intensity of its effect on the discharge magnitude of the corresponding cluster. The most common method of estimating the regression model is the stepwise method (53). In this method, first, the variable that has the highest normal correlation coefficient with the dependent variable, if its F statistic is greater than the predetermined F (F entry), is entered into the equation. The next variables are also entered in the model in the same way, but simultaneously with the entry of each new variable, all the variables in the equation are examined (their partial F is calculated) and if each of them has lost its significance level, they will be removed from the process. This operation is repeated and at the end of it, no variable with a significant level lower than the determined level will be present in the equation. Mentioned process started with A-T (Annual Temperature) with 0.93 of negative correlation. It was followed by TD\_d (Total drainage density), F (Forest's area), S-S (Stream Slope), P-F (Permeable Formation percentage), and C-F (Carbonic Formation percentage). In the following, to check the final formula of regional discharge estimation, for validation, regression was first performed in 10 stations. According to the results, the value of significance F for the measured flow rate and six independent variables is 0.03. Considering the confidence factor of 95% and the low value of Significance F (less than 0.05), the regression is acceptable. According to the Table 8, the P values for three independent variables were lower or very close to 0.05, so these three independent variables determine the major part of the flow rate changes.



**Table 8.** The results of regression among six independent variables and discharge values in 10 sub-watersheds.

	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> adj	F Significance	
<b>Regression</b>	0.96	0.88	0.032	
<b>Variables</b>	<b>S-S</b>	<b>P-F</b>	<b>A-T</b>	<b>Intersection</b>
<b>P-Value</b>	0.049	0.007	0.064	0.050
<b>Coefficient</b>	-0.859	0.16	-1.08	20.98

The resulting relation will be as follows:

$$Q_T = \alpha(S - S) + \beta(P - F) + \gamma(A - T) + z \quad (9)$$

Where  $Q_T$  is the discharge magnitude for T-year return period in  $m^3/s$ . S-S, P-F, and A-T are stream slope, permeable formation percentage, and average annual temperature, respectively. The coefficients of the regression equation are also given in Table 8. The slope of the main stream has a negative effect on the magnitude of discharge. For a certain amount of precipitation, the slope of the stream will cause the quick exit of the discharge. Therefore, the retention of rain in the sub-watershed is short and the discharge will not affect the following days much. Therefore, the steep slope of the stream will decrease the average annual discharge. On the other hand, the percentage of permeable formations has been introduced as the second influencing variable with a positive effect on the flow rate. The high infiltration of rainfall and runoff in the watershed slows down and reduces the amount of water reaching the river and finally to the outlet of the watershed. But in the watersheds near the sea, due to the saturation of the aquifers, sometimes it is not possible for water to penetrate. Therefore, the precipitation flows quickly and turns into discharge. In the studied watersheds, the rate of water infiltration in impermeable carbonate formations is much higher than in other formations due to deep and large fractures. The third variable affecting the discharge rate is the average annual temperature with a negative impress.

In the next step the final relation was validated in three sub-watersheds that were not included in the regression. The results are summarized in Table 9.

**Table 9.** The results of equation validation in three sub-watersheds (Gonbad, Naharkhoran and Lazoureh)

Sub-watershed	Observed ( $m^3/s$ )	Estimated ( $m^3/s$ )
<b>Gonbad</b>	2.09	3.05
<b>Naharkhoran</b>	0.43	0.44
<b>Lazoureh</b>	2.48	2.21

Based on the validation estimations, the regional model could be acceptable.

#### 4. Conclusion

The present study reports a regional analysis carried out in the north of Iran, with the aim of L-moments approach evaluation for predicting flood discharge at different return periods. An accurate data screen of about 13 sub-watershed gauging stations was accomplished with the help of existing flood data for regional flood frequency analysis. Firstly, the whole study area was analyzed and then was categorized as two sub-regions defined by cluster analysis technique. In conditions with short data records, the application of probability distributions for predicting the flood magnitude in different return periods does not seem rational. However, the application of the L-moments technique facilitates increasing the data length at regional flood frequency

analysis. The L-moments approach simultaneously uses several homogeneous watershed data during a hydrologic analysis.

The results of the PCA technique for the determination of the main variables showed that the 30 independent variables could be summarized into six components. The mean annual temperature, total drainage density, forest's area, stream slope, permeable formation percentage, and carbonic formation percentage of sub-watersheds were identified as the most important variables of the six components. Mentioned variables as representatives of six components carry the variation of discharge magnitude (91.87% of total variance).

The Ward's method as a hierarchical clustering method is a proper approach for regionalization in hydrology studies. The results of homogeneity test based on L-moments approach at the whole study area indicated the study area should be divided into two homogeneous sub-regions. The least number of series to calculate regional equations is 5 and because of inadequate data series having an equation for the region (2) with one sub-basin was not possible. So the whole case study has been considered as one homogeneous region. The results of the L-moment ratios and the Z-statistic criteria identified GPA distribution as the fittest distribution among five candidates for all the proposed clusters of the study area.

Finally, based on the results of clustering and stepwise regression, only three variables defining flood discharge magnitude were considered. In general, it can be said that due to the fact that the synoptic stations with more than 30 years of data series as well as reliable statistical tests have been used for data analysis, the regional estimation of discharge with the used methods can be accepted with great confidence. This regional model can be used to estimate discharge in areas with similar climatic and hydrological conditions where measured data are not available.

#### References

- [1] Hamed, K. and Rao, A.R. eds. 2019. Flood frequency analysis. CRC press.
- [2] Lawrence, D. 2020. The uncertainty introduced by flood frequency analysis in projections for changes in flood magnitudes under a future climate in Norway, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28, p.100675.
- [3] Hasan, I.F. 2020. Flood Frequency Analysis of Annual Maximum Streamflows at Selected Rivers in Iraq, *Jordan Journal of Civil Engineering*, 14.4
- [4] Malekinezhad, H., Nachtnebel, H.P. and Klik, A. 2011. Comparing the index-flood and multiple-regression methods using L-moments, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36.1-4, p.54-60.
- [5] Maghsood, F.F., Moradi, H., Massah Bavani, A.R., Panahi, M., Berndtsson, R. and Hashemi, H. 2019. Climate change impact on flood frequency and source area in northern Iran under CMIP5 scenarios, *Water*, 11.2, p. 273.
- [6] State Water Policy, Government of Rajasthan, 1999. Department of Irrigation. <http://waterresources.rajasthan.gov.in/>.
- [7] Stedinger, J.R. and Tasker, G.D. 1985. Regional hydrologic analysis: 1. Ordinary, weighted, and generalized least squares compared, *Water Resources Research*, 21.9, p.1421-1432.
- [8] GREHY, G.D.R.E.S. 1996. Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis, *Journal of hydrology (Amsterdam)*, 186.1-4, p.63-84.
- [9] Jingyi, Z. and Hall, M.J. 2004. Regional flood frequency analysis for the Gan-Ming River basin in China, *Journal of Hydrology*, 296.1-4, p.98-117.
- [10] Bhat, M.S., Alam, A., Ahmad, B., Kotlia, B.S., Farooq, H., Taloor, A.K. and Ahmad, S. 2019. Flood frequency analysis of river Jhelum in Kashmir basin, *Quaternary International*, 507, p.288-294.
- [11] Caffero, L., Monforte, I., Mazzoglio, P., Ganora, D., Laio, F., Claps, P. and Viglione, A. 2023. Bayesian Spatially Smooth Regional Estimation of flood quantiles: Case study in Northern Italy, In *Titolo volume non avalorato*, IUGG.
- [12] Kim, N.W., Lee, J.Y., Park, D.H. and Kim, T.W. 2019. Evaluation of future flood risk according to RCP scenarios using a regional flood frequency analysis for ungauged watersheds, *Water*, 11.5, p.992.
- [13] Acreman, M. and Wiltshire, S. 1989. The regions are dead. Long live the regions. Methods of identifying and dispensing with regions for flood frequency analysis, IAHS-AISH publication, 187, p.175-188.

- [14] Burn, D. H. 1990. Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach, *Water Resources Research*, 26.10, p.2257-2265.
- [15] Burn, D.H. 1997. Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *Journal of hydrology*, 202.1-4, p.212-230.
- [16] Hosking, J.R.M. and Wallis, J.R. 1997. Regional frequency analysis, p. 240.
- [17] Shu, C. and Burn, D.H. 2004. Homogeneous pooling group delineation for flood frequency analysis using a fuzzy expert system with genetic enhancement. *Journal of Hydrology*, 291.1-2, p.132-149.
- [18] Ouarda, T.B.M.J., Ba, K., Diaz-Delgado, C., Carsteanu, A., Gingras, H., Quentin, E., Trujillo, E. and Bobee, B. 2007, May. Regional flood frequency estimation at ungauged sites in the Balsas River Basin, Mexico, In AGU Spring Meeting Abstracts (Vol. 2007, p. H51B-02).
- [19] Shu, C. and Ouarda, T.B. 2008. Regional flood frequency analysis at ungauged sites using the adaptive neuro-fuzzy inference system, *Journal of Hydrology*, 349.1-2, p.31-43.
- [20] Pagliero, L., Bouraoui, F., Diels, J., Willems, P. and McIntyre, N. 2019. Investigating regionalization techniques for large-scale hydrological modelling, *Journal of hydrology*, 570, p.220-235.
- [21] Song, Z., Xia, J., Wang, G., She, D., Hu, C. and Hong, S. 2022. Regionalization of hydrological model parameters using gradient boosting machine, *Hydrology and Earth System Sciences*, 26.2, p.505-524.
- [22] Tasker, G.D. and Thomas Jr, W.O. 1978. Flood-frequency analyses with prerecord information, *Journal of the Hydraulics Division*, 104.2, p.249-259.
- [23] Acreman, M.C. and Sinclair, C.D. 1986. Classification of drainage basins according to their physical characteristics; an application for flood frequency analysis in Scotland, *Journal of Hydrology*, 84.3-4, p.365-380.
- [24] Stamey, T.C. and Hess, G.W. 1993. Techniques for estimating magnitude and frequency of floods in rural basins of Georgia, *Water-Resources Investigations Report*, 93, p.4016.
- [25] Kjeldsen, T.R., Smithers, J.C. and Schulze, R.E. 2002. Regional flood frequency analysis in the KwaZulu-Natal province, South Africa, using the index-flood method, *Journal of hydrology*, 255.1-4, p.194-211.
- [26] Farsadnia, F., Kamrood, M.R., Nia, A.M., Modarres, R., Bray, M.T., Han, D. and Sadatinejad, J. 2014. Identification of homogeneous regions for regionalization of watersheds by two-level self-organizing feature maps, *Journal of Hydrology*, 509, p.387-397.
- [27] Calegario, A.T., Pruski, F.F., Ribeiro, R.B., Ramos, M.C. and Rego, F.S. 2020. Physical analysis of regionalized flow as an aid in the identification of hydrologically homogeneous regions, *Engenharia Agrícola*, 40, p.334-343.
- [28] Walling, D.E. and Fang, D. 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers, *Global and planetary change*, 39.1-2, p.111-126.
- [29] Walling, D.E. 2006. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers, *Geomorphology*, 79.3-4, p.192-216.
- [30] Lamontagne, J.R., Stedinger, J.R., Yu, X., Whealton, C.A. and Xu, Z. 2016. Robust flood frequency analysis: Performance of EMA with multiple Grubbs-Beck outlier tests, *Water Resources Research*, 52.4, p.3068-3084.
- [31] Khazar Water Consulting Engineers Company, 1377. Report on the integration of studies on water resources of the Gorganrood and Qarasu basins, vol. 3.
- [32] Jamab Consulting Engineers, 1378, Report on Country Water Master Plan, Total and Coastal Watershed, Ministry of Energy, Tehran.
- [33] Nautiyal, M.D. 1994. Morphometric analysis of a drainage basin using aerial photographs: a case study of Khairkuli Basin, District Dehradun, UP, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 22, p.251-261.
- [34] Hotelling, H. 1933. Analysis of a complex of statistical variables into principal components, *Journal of educational psychology*, 24.6, p.417.
- [35] Zavareh, M., Maggioni, V., and Sokolov, V. 2021. Investigating water quality data using principal component analysis and granger causality, *Water*, 13.3, p.343.
- [36] Erunova, M.G., and Yakubailik, O.E. 2023. Methods and technologies for spatial analysis of regional ecosystems based on the watershed approach, *Integrated Environmental Assessment and Management*, 19.4, p.972-979.
- [37] McKenna Jr, J.E. 2003. An enhanced cluster analysis program with bootstrap significance testing for ecological community analysis, *Environmental Modelling & Software*, 18.3, p.205-220.
- [38] Mohammadi, S.A. and Prasanna, B.M. 2003. Analysis of genetic diversity in crop plants—salient statistical tools and considerations, *Crop science*, 43.4, p.1235-1248.
- [39] Vega, M., Pardo, R., Barrado, E. and Debán, L. 1998. Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis, *Water research*, 32.12., p.3581-3592.
- [40] Otto, M. 1998. Multivariate methods. *Analytical chemistry*, 916.
- [41] Cupak, A. and Michalec, B. 2022. Regionalisation of watersheds with respect to low flow, *Journal of Water and Land Development*, 55.
- [42] Ward Jr, J.H. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function, *Journal of the American statistical association*, 58.301, p.236-244.
- [43] Willmott, C.J. and Vernon, M.T. 1980. Solar climates of the conterminous United States: A preliminary investigation, *Solar Energy*, 24.3, p.295-303.
- [44] Winkler, J.A. 1985. Regionalization of the diurnal distribution of summertime heavy precipitation. In Preprints, Sixth Conf. on Hydrometeorology, Indianapolis, IN, Amer. Meteor. p. 9-16.
- [45] Kalkstein, L.S. and Corrigan, P. 1986. A synoptic climatological approach for geographical analysis: assessment of sulfur dioxide concentrations, *Annals of the Association of American Geographers*, 76.3, p.381-395.
- [46] Nathan, R.J. and McMahon, T.A. 1990. Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalization, *Journal of Hydrology*, 121.1-4, p.217-238.
- [47] Adhami, M. 2012. Estimation of suspended sediment load using physical characteristics in Gorganroud and Ghareh-Sou Watersheds. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. MS Thesis, p125, Gorgan, Iran.
- [48] Hosking, J.R., 1990. L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics, *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 52.1, p.105-124.
- [49] Vogel, R.M. and Fennessey, N.M. 1993. L moment diagrams should replace product moment diagrams, *Water resources research*, 29.6., p.1745-1752.
- [50] Hosking, J.R.M. and Wallis, J.R. 1993. Some statistics useful in regional frequency analysis, *Water resources research*, 29.2., p.271-281.
- [51] Pandey, G.R. and Nguyen, V.T.V. 1999. A comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis, *Journal of Hydrology*, 225.1-2, p.92-101.
- [52] Yu, G., Wright, D.B., Zhu, Z., Smith, C. and Holman, K.D. 2019. Process-based flood frequency analysis in an agricultural watershed exhibiting nonstationary flood seasonality, *Hydrology and Earth System Sciences*, 23.5, p.2225-2243.
- [53] Moazzami, M., Feyznia, S. 2016. Regional Analysis of Suspended Sediment (Case Study of Jarhiri River), 4th National Conference on Watershed Science and Engineering of Iran, Watershed Management, Karaj.



## Buffer ve Network Analiz Teknikleri Kullanılarak Kentsel Aktif Yeşil Alanlar için Mekânsal Yeterlilik ve Erişilebilirlik Analizi

### Spatial Adequacy and Accessibility Analysis for Urban Green Spaces Using Buffer and Network Analysis Techniques

Münevver Gizem Gümüş<sup>1\*</sup>, Hasan Çağatay Çiftçi<sup>2</sup>, Kutalmış Gümüş<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Niğde Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Niğde, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kayseri, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author\*: gizemkisaaga@ohu.edu.tr

#### Öz

Ülkemizde özellikle son yıllarda sanayileşmenin ve hızlı nüfus artışının getirisi olarak artan çevre kirlilikleri, geçen yıl yaşanan yangın ve bu yıl devam eden deprem ve sel felaketleri gibi doğal afetlerin hızlı artışı, Covid-19 gibi salgın hastalıkların sönümlenmeden devam etmesi durumu sebebiyle sürdürülebilir kentlere olan ihtiyaç giderek daha ciddi bir boyuta ulaştığı gözlemlenmektedir. Sürdürülebilir kentlerin tasarlanmasındaki kritik fenomenlerden birisi de kentsel aktif yeşil alanların mevcudiyeti ve mekânsal olarak tasarlanmasıdır. Arazi kullanımında yapılan halihazırda yanlış planlamalar, özellikle sürekli yapılaşma faaliyetleri, kentsel yeşil alanların mevcudiyeti ve yeterliliğini giderek azalttığı gözlemlenmektedir. Bu çalışmada, Niğde kent merkezi örneğinde aktif yeşil alan olarak tanımlanan Çocuk Oyun Alanları (ÇOA), Semt/Mahalle Park Alanları (SPA) ve Spor Alanları (SA) için mekânsal yeterlilik ve erişilebilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler için 14.06.2014 tarih, 29030 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliğindeki kriterler esas alınmıştır. Mekânsal yeterlilik analizi sonucunda Niğde kent merkezinde bulunan 26 adet mahalle içerisindeki 24 adet mahallenin aktif yeşil alanların yetersiz düzeyde olduğu sadece 2 adet mahallenin yönetmelikteki standartlara uygunluk gösterdiği tespit edilmiştir. Yasal yönetmelikte yer alan kişi başı 10m<sup>2</sup>/kişi standardının yakalanmaması hazırlanan imar planlarının aktif yeşil alanlar üzerindeki planlamaların yetersizliğini açığa çıkarmıştır. Çalışmada mekansal erişilebilirlik değerlendirmesi için Buffer ve Network analiz yöntemleri kullanılmış ve yöntemler birbiri ile karşılaştırılmıştır. Yöntem karşılaştırmasında ise Network analiz tekniğinin Buffer analiz tekniğine kıyasla çoklu girdi parametresi kullanılması sebebiyle daha kapsamlı ve gerçekçi sonuç ürün sunduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Aktif Yeşil Alan, Buffer Analizi, Erişilebilirlik, Mekânsal Yeterlilik, Network Analizi

#### Abstract

Due to the increasing industrialization and rapid population growth in our country, as well as the rapid increase in natural disasters such as last year's fire and this year's ongoing earthquake and flood disasters, and the continuation of pandemic diseases such as Covid-19, the need for sustainable cities has become increasingly compelling. One of the critical phenomena in designing sustainable cities is the existence and spatial design of urban active green spaces. The current incorrect planning in land use, especially the continuous construction activities, has been observed to reduce the existence and adequacy of urban green areas gradually. In this study, spatial adequacy and accessibility analyses were conducted for active green spaces defined as children's playgrounds, neighborhood/park areas, and sports areas in the Niğde city center example. The criteria in the Spatial Plans Construction Regulation published in the Official Gazette dated 14.06.2014 and numbered 29030 were taken as the basis for these analyses. As a result of the spatial adequacy analysis, it was found that in the 26 neighborhoods in Niğde city center, only 2 neighborhoods met the standards in the regulations, and 24 neighborhoods had insufficient active green areas. The failure to meet the standard of 10m<sup>2</sup>/person per the legal regulations revealed the inadequacy of the planning on active green areas in the prepared zoning plans. Buffer and Network analysis methods were used for spatial accessibility evaluation in the study, and the methods were compared with each other. In the method comparison, it was determined that the Network analysis technique provided more comprehensive and realistic results by using multiple input parameters compared to the Buffer analysis technique.

**Keywords:** Active Green Space, Buffer Analysis, Accessibility, Spatial Adequacy, Network Analysis

#### EXTENDED ABSTRACT

##### Introduction

In this text, the importance of urban active green spaces is emphasized, and the concepts of spatial adequacy and accessibility are discussed. Spatial adequacy affects participation

in activities in the physical environment, while accessibility defines access to resources based on various factors. There are various studies in the literature on the accessibility of green spaces in cities. These studies encompass various methods, from

modeling the accessibility of parks in cities to developing accessibility indices for green spaces and measuring accessibility to green spaces using buffer analysis and network analysis methods [19-29]. These studies in the literature highlight the need to address green spaces within the framework of policies and emphasize the importance of measuring accessibility through multiple analyses. Additionally, it is noted that open and green spaces have a positive impact on social rehabilitation processes and public health [30]. Therefore, green spaces need to be addressed in a sustainable manner through goals, planning approaches, and legal regulations.

In this study, the spatial adequacy and accessibility levels of existing active green spaces within the widely accepted Niğde city center in a medium-scale urban area are analyzed. For this purpose, the input parameter set consists of active green spaces in the city center, namely Children's Play Areas (CPA), Sports Areas (SA), and Neighborhood Park Areas (NPA). All data related to active green spaces were provided by the Niğde Municipality Parks and Gardens Directorate. Spatial accessibility analyses were performed using Buffer and Network analysis methods separately, and the results of all methods were compared to present conclusions and interpretations.

## Materials and Methods

**Study Area and Geographic Characteristics:** Niğde city center is located in the Central Anatolian region of Turkey, situated within six different districts administratively. This settlement, known as the Cappadocia region, is geographically located between 38.654°N, 37.154°E, 35.761°S, and 33.644°W coordinates. Niğde has a land area of 7,312.00 km<sup>2</sup>, and its elevation is 1,229 m. It has a typical Central Anatolian continental climate, with hot and dry summers and cold and rainy winters.

**Population and Neighborhood Distribution:** According to the TURKSTAT data as of December 31, 2021, Niğde's total population is 363,725, with the city center's population being 166,511. Niğde city center consists of 26 neighborhoods, with Aşağı Kayabaşı being the most populous neighborhood. Population density is an important factor for understanding the distribution of populations in geographical regions. Şahsüleyman Neighborhood stands out as the most densely populated, while Hamamlı Neighborhood has the least population density.

**Green Space and Data Acquisition:** According to the data provided by the Niğde Municipality Parks and Gardens Directorate, the focal point of the study is the neighborhoods within the municipal boundaries of Niğde. The green space data used in the study were obtained in Excel format. Neighborhood boundaries and base orthophoto maps were obtained from the Niğde Municipality Planning and Urbanization Directorate.

**Spatial Adequacy and Accessibility Analysis:** Spatial adequacy analyses for urban active green spaces were first performed on the digitized data substrate using ArcGIS 10.8.2 software. The distribution of active green space per person was determined for each neighborhood, and spatial accessibility levels were later analyzed using Buffer and Network analysis methods. The impact areas of active green spaces were compared comparatively with these analyses.

## Results and Discussion

Spatial adequacy analyses of active green spaces in the 26 neighborhoods of Niğde city center were performed using ArcGIS 10.8.2 software. With data obtained from the Niğde Municipality Parks and Gardens Directorate, a total area of 954,134 m<sup>2</sup> was evaluated, covering Children's Play Areas (CPA), Sports Areas

(SA), and Neighborhood Park Areas (NPA). The neighborhoods with the most Children's Play Areas are İlhanlı and Aşağı Kayabaşı, while some neighborhoods have no Children's Play Areas. In terms of sports areas, Aşağı Kayabaşı, İlhanlı, and Efendibey neighborhoods have the largest areas. According to spatial standards updated in 2014, the minimum green area per person was determined as 10 m<sup>2</sup>. Minimum green area standards and impact areas for different population groups were also determined and presented in tables. In the study, spatial adequacy and accessibility analyses of active green spaces in the 26 neighborhoods of Niğde city center were conducted. Spatial adequacy analyses revealed that only Kale and Çayır neighborhoods comply with the green area standards specified in the regulations. It was determined that the remaining 24 neighborhoods fall below the standards. Green space density was mapped into three classes, low, medium, and high density, using ArcGIS software. According to this analysis, it was evaluated that 11 neighborhoods are high-density, and 15 neighborhoods are low-density.

In the second part of the study, spatial accessibility analyses of active green spaces in Niğde city center were conducted. In this analysis, a total of 242 green space data points for 26 neighborhoods were used, and the impact areas of these spaces were determined using Buffer and Network analysis techniques. The analysis results were used to evaluate the impact areas determined for different types of green spaces. According to the impact areas determined by Buffer analysis, it was found that 11 neighborhoods have high density, and 15 neighborhoods have low density. Additionally, in the analyses conducted using the Network analysis technique, spatial accessibility was evaluated with more complex planning. In this analysis, walking times for individuals at different speeds to access green spaces were determined using road network data. When the results of the two analysis techniques were compared, it was found that the Network analysis provides more comprehensive and realistic results. Network analysis stands out as a preferred method because it can evaluate environmental factors in more detail and produce visually more accurate results.

## Conclusion

This study emphasizes the critical role of the presence and spatial design of active green spaces in sustainable urban planning. The analysis results indicate that active green spaces are insufficient in many neighborhoods in Niğde city center, and the legally specified standard of 10 m<sup>2</sup> per person cannot be achieved. Supporting this situation, green area studies in Niğde state that structural areas have doubled and green area quantities have halved over a 10-year period [37]. It is also noted that the continuous expansion of the city center with the increase in population adversely affects active green spaces and causes significant damage to the ecosystem [39]. A noteworthy feature of this study is the use of Buffer and Network analysis methods for spatial accessibility assessment. The comparison of these methods reveals that the Network analysis technique provides more detailed and realistic results. This demonstrates that the examination of spatial adequacy analyses with different methodologies enhances the reliability of the study.

The results of the study serve as an important reference for urban planning and management. It emphasizes the necessity of considering critical elements such as the existence of urban green spaces and their effective planning in the design of sustainable cities. The study clearly illustrates how these critical phenomena are applied in the example of Niğde city center.

## 1. Giriş

Açık alan tanımları dâhilinde değerlendirilen yeşil alanlar, mülkiyet ve kullanım durumuna göre farklılıklar gösterir. Yeşil alanlar, mülkiyet özelinde değerlendirildiğinde, kamusal ve özel yeşil alanlar olarak, kullanım özellikleri hususunda değerlendirildiğinde ise aktif ve pasif yeşil alanlar olarak kategorize edilmektedirler. Kullanım özellikleri bakımından pasif yeşil alanlar, mezarlık, askeri yeşil alanlar, tarımsal yeşil alanlar, korular, trafik alanları gibi toplumun doğrudan kullanımına açık olmayan, genellikle çevre sağlığı, peyzaj, koruma altına alınmış ya da estetik amaçlı düzenlenen alanlar olarak tanımlanmaktadır [1,2]. Aktif yeşil alanlar ise, insanların doğal ortamda fiziksel aktivite yapabilmeleri, dinlenebilmeleri ve sosyalleşebilmeleri için tasarlanmış, toplumun doğrudan erişimine ve kullanımına açık hava alanlarıdır. Bu alanlar, insan sağlığına, sosyal ve ekonomik refaha, doğal çevrenin korunmasına ve sürdürülebilir kentlerin oluşmasına katkı sağlar [3,4]. Aktif yeşil alanlar, açık hava spor aktiviteleri için uygun alanlar, yürüyüş ve bisiklet yolları, yeşil alanlar, oyun alanları, parklar, bahçeler, su kenarları gibi çeşitli tiplerde olabilirler. Bu alanlar, aynı zamanda doğal habitatların korunmasına ve biyoçeşitliliğin artırılmasına da katkı sağlayabilirler.

Sürdürülebilir planlamada, aktif yeşil alanların planlanması ve yönetimi, doğal kaynakların korunması, iklim değişikliğiyle mücadele, enerji tasarrufu, çevresel sürdürülebilirlik ve mekânsal erişilebilirlik gibi konuların ele alınmasını gerektirir. Özellikle kent merkezlerinde mevcudiyetini gösteren nüfus baskısına paralel olarak sürekli yapılaşma faaliyetleri, karbon salınımları sebebiyle kentsel ısı adaları oluşmakta ve çevresindeki yeşil alanlara oranla yaklaşık 1,3-3,4°C [5] fazla ısı değerleri gözlemlenmektedir [6]. Bu sebeple kentsel alanlarda aktif yeşil alanların varlığı, toplumun yaşam kalitesi için oldukça dikkat çekilmesi gereken bir odaktır. Dolayısıyla aktif yeşil alanların tasarımı ve yönetimi, doğru materyallerin kullanılması, su yönetimi, atık yönetimi, enerji tasarrufu ve karbon salınımının azaltılması gibi sürdürülebilirlik ilkelerine dayalı olarak uygulanmalıdır.

Aktif yeşil alanlar, insanların doğayla bağlantılarını güçlendirerek sağlık ve refahlarını artırırken, çevre sürdürülebilirliği ve toplumsal fayda konularında da katkı ve hizmet sağlayan çok boyutlu bir araçtır (Tablo 1). Bu nedenle kentsel aktif yeşil alanların yeterliliğinin araştırılması ve erişilebilirlik düzeylerinin sorgulanması, sürdürülebilir kent tasarımı kapsamında ele alınması gereken iki önemli odak konusunu oluşturur.

Mekânsal yeterlilik kavramı, bir kişinin fiziksel çevresindeki aktivitelere katılımını etkileyen faktörlerin bir ölçüsüdür. Mekânsal yeterlilik, bir kişinin fiziksel aktiviteleri gerçekleştirebilmek için erişebilir, güvenli ve uygun bir çevreye sahip olup olmadığını belirleyen bir kavramdır. Mekânsal yeterlilik, çeşitli faktörlerden etkilenir. Bunlar arasında bölgenin yürüyüşe ve bisiklete binmeye uygun olması, uygun yaya yollarının ve bisiklet yollarının varlığı, engelli erişiminin kolaylığı, ulaşım seçenekleri ve çevresel faktörler (örneğin, su kalitesi, hava kirliliği) yer alır. Mekânsal yeterlilik, bir kişinin fiziksel aktivitelerini gerçekleştirmesine yardımcı olan önemli bir faktördür. Bu nedenle, sağlıklı bir yaşam tarzının sürdürülmesi için mekânsal yeterliliğin artırılması önemlidir.

Mekânsal erişilebilirlik kavramı ise, bir kişinin fiziksel çevresindeki kaynaklara (iş yeri, okul, hastane, alışveriş merkezi, park, vb.) erişebilme yeteneği veya fırsatı olarak tanımlanmaktadır. Çünkü bir kentin daha yaşanabilir ve erişilebilir olma hususu öncelikli olarak mekânsal erişilebilirlik

düzeyi ile doğru orantılıdır [18]. Bu, kişinin konutuna, çalışma saatlerine, sosyal durumuna, ulaşım imkânlarına, fiziksel engellerine ve diğer faktörlere bağlıdır. Mekânsal erişilebilirlik, toplumsal katılım ve sosyal eşitliği sağlamak için önemlidir. Engelli bireyler, yaşlılar, çocuklar, yoksullar ve diğer dezavantajlı gruplar gibi bazı kişiler, fiziksel engeller nedeniyle mekânlara erişimde zorluklar yaşayabilirler. Bu kişilerin engelleri aşmalarına yardımcı olmak için, erişilebilirlik standartları ve politikalarına uygun standartlarda yeşil alan oluşumları yapılmalıdır.

**Tablo 1.** Aktif yeşil alanların farklı boyuttaki katkıları [7-17].

**Table 1.** Contributions of active green areas in different dimensions [7-17].

<b>EKOLOJİK</b>	<b>SOSYO-KÜLTÜREL</b>	<b>EKONOMİK</b>	<b>MEKANSAL VE YAPISAL</b>	<b>FİZİKSEL VE ESTETİK</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kent milroklı ması oluşturur ve iyileştirir.</li> <li>• Biyoçeşitliliği artırır.</li> <li>• Kentsel ısı adalarını azaltır.</li> <li>• Karbonu tutar ve depolar.</li> <li>• Kent toprağın daki su kapasitesini artırır.</li> <li>• Hava kirliliğini emer.</li> <li>• Toz ve partikülleri tutar.</li> <li>• Havanın, toprağın ve suyun korunmasını sağlar.</li> <li>• Toprağın verimliliğini sağlar.</li> <li>• Gürültüden kaynaklı kirliliği önler.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sağlıklı yaşam tarzı oluşturur.</li> <li>• Rekreasyon etkinlik imkanı sunar.</li> <li>• Kültürel değer oluşturur.</li> <li>• Eğitsel işlevi vardır.</li> <li>• Doğa ve çevre koruma farkındalığı ve bilinçlendirme sağlar.</li> <li>• Stresi azaltır.</li> <li>• Terapötik işlev görür.</li> <li>• Sosyal kaynaşmayı sağlar.</li> <li>• Sosyal iletişimi ve etkileşimi artırır.</li> <li>• Topluma huzur ve rahatlık sağlar.</li> <li>• Fiziksel ve zihinsel sağlık sorunlarını onarır ve iyileştirir.</li> <li>• Gelişim becerileri ve bilişsel yetenekleri içerir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Üretim işlevi vardır.</li> <li>• İstihdam işlevi görür.</li> <li>• Rekabetçi değer oluşturur.</li> <li>• Kentsel turizm değerini artırır.</li> <li>• İşgücü ve verimi artırır.</li> <li>• Enerji verimliliği sağlar.</li> <li>• Bulundugu çevrede mülk değerini artırır.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kentsel yapıyı ve karakterini oluşturur ve tanımlar.</li> <li>• Kentsel dokuyu oluşturur.</li> <li>• Kentsel kimliği oluşturur.</li> <li>• Mekan kullanım ları arası tampon işlevi görür.</li> <li>• Kentsel mekanlar arasında organik bağlantı oluşturur.</li> <li>• Kentin monoton geometrisini azaltır.</li> <li>• Yapı enerjisi maliyetlerini düşürür.</li> <li>• Kentsel yağmur suyunu toplama kapasitesini artırır.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kitle etkisi yapar.</li> <li>• Yönlendirme sağlar.</li> <li>• Mekanları sınırlar ve ayırır.</li> <li>• Landmark etkisi yapar.</li> <li>• Perspektif ve derinlik kazandırır.</li> <li>• Vurgu etkisi yaratır.</li> <li>• Hareketli renkli ve ışıklı bir ortam sağlar.</li> <li>• Işığın elimine eder.</li> <li>• Gürültüyü azaltır.</li> <li>• Gizlilik ve mahremlik sağlar.</li> <li>• Kentsel alan içerisindeki kötü görüntüleri kamufle eder.</li> </ul>

Aktif ve yeşil alanların mekânsal yeterliliği ve erişilebilirliği konusunda literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar, kentlerdeki parkların erişilebilirliğini modellenmesinden, yeşil alanlar için erişilebilirlik endeksleri geliştirmeye, tampon analizi ve ağ analiz yöntemlerini kullanarak yeşil alanlara erişilebilirliği ölçmeye kadar çeşitli yöntemleri içermektedir.

Örneğin, [19], kent çeperindeki parkların erişilebilirliği için bir model geliştirmiş ve parkın kapasitesini, talep nüfusunu,



mesafeyi, yol koşullarını ve ulaşım modlarını dikkate almıştır. [20], kentsel yeşil alanların hiyerarşik düzeylerinde erişilebilirliğini değerlendirmek için CBS tabanlı analiz yöntemlerinden ağ ve tampon analizini karşılaştırmalı olarak kullanmıştır. [21], Şangay örneğinde yeşil alanlar için erişilebilirlik endeksi geliştirmiş ve [22], tampon analizi yöntemini kullanarak mekânsal planlamanın zorluklarını ortaya koymuştur. [23] ise zaman analizi kullanarak kentsel parklara erişilebilirliği tahmin etmiştir.

Ülkemizde de benzer çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin, Uşak kentindeki yeşil alanların erişilebilirliği için tampon analiz yöntemi kullanılmıştır [24,25]. Ayrıca Uşak kentinde kentsel yayılma bağlamında açık ve yeşil alanların stratejileri belirlenmiştir [26]. [27], Erzurum kentindeki üç mahallenin yeşil alanlar ile çocuk oyun alanlarının tampon erişilebilirlik analizini yapmışlardır. [28], İzmit şehri yeşil alan yeterliliği ve erişilebilirlik düzeyi analiz edilmiş ve Ağ analiz yöntemi ile yürüme mesafelerine dayalı olarak yeşil alanların hizmet alanlarının haritalanması yoluyla erişilebilirlik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. [29], çalışmada yeşil alanların ekolojik bağlantılılığının mekânsal zamansal açıdan değerlendirmiş ve bağlantı haritalarının oluşturulmasında ve bağlantılılığın yorumlanmasında morfolojik mekânsal patern analizi ve network analizi kullanılmıştır.

Literatürdeki bu çalışmalar, yeşil alanların politika çerçevesinde ele alınması gerektiğini ve erişilebilirliğin çoklu analizlerle ölçülmesinin önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, açık ve yeşil alanların toplumsal rehabilitasyon süreçlerine ve halk sağlığına olumlu yönde etki ettiği de belirtilmektedir [30]. Bu nedenle, yeşil alanların sürdürülebilir hedefler, planlama yaklaşımları ve yasal düzenlemelerle ele alınması gerekmektedir.

Bu çalışmada, orta ölçekli bir kent uzamında kabul gören Niğde kent merkezi içerisinde mevcut olarak bulunan aktif yeşil alanların mekânsal olarak yeterliliği ve erişilebilirlik düzeyleri analiz edilmiştir. Bu kapsamda aktif yeşil alan olarak kent merkezinde bulunan Çocuk oyun alanları (ÇOA), Spor alanları (SA) ve Semt/Mahalle park alanları (SPA) girdi parametre setini oluşturmuştur. Aktif yeşil alanlara yönelik tüm veriler Niğde

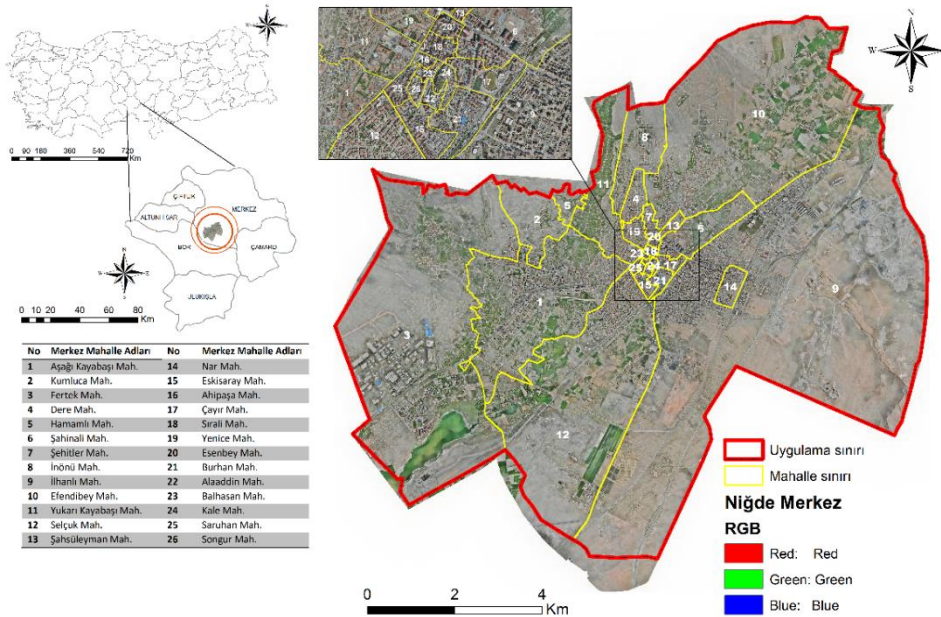
Belediyesi Park ve Bahçe Müdürlüğü'nce temin edilmiştir. Çalışmada mekânsal erişilebilirlik analizinde Buffer ve Network analiz metotları ayrı ayrı kullanılmış ve tüm metotların sonuçları birbiri ile karşılaştırılarak sonuç ve yorumlar sunulmuştur.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Çalışma alanı

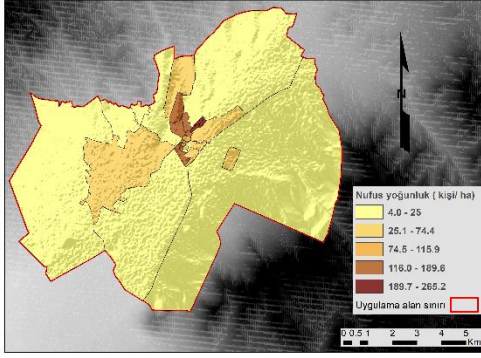
Orta ölçekli bir kent olan Niğde kent merkezi (merkez mahalleleri) çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Türkiye'nin iç Anadolu bölgesinin Orta Kızılırmak Bölümünde konumlanan, Kapadokya bölgesi olarak anılan ve idari sınırı içerisinde 6 farklı ilçeye (Bor, Merkez, Altunhisar, Ulukışla, Çiftlik, Çamardı) ayrılan bir yerleşimdir (Şekil 1). 38.654°K, 37.154°G, 35.761°D ve 33.644°B koordinatları arasında yer alan Niğde kentinin yüzölçümü 7.312,00 km<sup>2</sup> olmakla birlikte kent rakımı 1.229 m'dir. Niğde iklimi İç Anadolu'nun tipik karasal iklimi özelliğine sahiptir. Bölgede yaz mevsimleri sıcak ve kurak, kış mevsimi ise soğuk ve yağışlıdır.

31 Aralık 2021 Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre Kent nüfusu 363.725 kişi olup kentin il merkezinin toplam nüfusu ise 166.511 kişidir [31]. Niğde ili bu haliyle orta ölçekli bir kent özelliğindedir. Bu çalışmada yeşil alan yeterlilik ve erişilebilirlik durumunu analiz etmek için Niğde Belediyesi mücavir alan sınırı çalışma alan sınırı olarak belirlenmiştir. Niğde il merkezinde toplam 26 mahalle mevcuttur. 36.761 kişi ile en fazla nüfusu olan mahalle Aşağı Kayabaşı Mahallesi'dir. 23.989 kişi ile Efendibey Mahallesi, 21.837 kişi ile Selçuk Mahallesi ve 21.675 kişi ile İlhanlı Mahallesi onu takip eder. Nüfusu en az olan mahalle ise 51 kişi ile Alaaddin Mahallesi'dir. Bu mahalleyi 142 kişi ile Kale Mahallesi ve 191 kişi ile Hamamlı Mahallesi takip eder. Nüfus yoğunluğu, coğrafi bölgelerin nüfus dağılımını anlamak için kullanılır. Ayrıca, ekonomik ve sosyal kalkınma planlaması, nüfus kontrolü, çevre yönetimi ve ulaşım planlaması gibi alanlarda da önemli bir faktördür. Şekil 2'de gösterilen il merkez mahalle nüfus yoğunluğuna bakıldığında ise 265.24 (kişi/ha) oranı ile en yoğun mahallenin Şahsüleyman Mahallesi olduğu, 5.11 (kişi/ha) oranı ile de en az yoğunluk gösteren mahallenin Hamamlı Mahallesi olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı konumu ve mahalle sınırlarının gösterimi

Figure 1. Study area location and neighbourhood boundaries



**Şekil 2.** Niğde ili merkez mahalleleri nüfus yoğunluk haritası

**Figure 2.** Nigde city centre neighbourhoods population density map

Çalışma alanına ait yeşil alan verilerinin tamamı Niğde Belediyesi Park ve Bahçeler Müdürlüğü'nce excel formatında temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan mahalle sınırları ve altlık ortofoto haritalar ise Niğde Belediyesi İmar ve Şehircilik Müdürlüğü'nce temin edilmiştir. Bölgeye ait tüm veriler ArcGIS 10.8 yazılımı kullanılarak sayısallaştırılmıştır. Oluşturulan veri altlığı ile öncelikle kentsel aktif yeşil alanlar (Çocuk oyun alanları, Spor alanları ve Semt/Mahalle parkları) için mekânsal yeterlilik analizleri gerçekleştirilmiş, her mahalle için ayrı ayrı kişi başına düşen aktif yeşil alan dağılımı belirlenmiş ve daha sonra ise Buffer ve Network analiz yöntemleri ile mekânsal erişilebilirlik düzeyleri analiz edilerek aktif yeşil alanları etki alanları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

## 2.2. Buffer (Tampon) analizi

Bir noktadan, çizgiden veya alan özelliklerinden belirli bir mesafe veya tampon mesafesi içinde kalan alanları hesaplayan bir coğrafi işlemdir [32]. Bu işlem, özellikle arazi kullanım planlaması, çevre planlaması ve yol ağı planlaması gibi alanlarda kullanılır. Yeşil alan erişilebilirlik çalışmalarında tampon analizi, yeşil alanların belirli bir mesafede hangi noktalara ve alanlara erişilebilir olduğunu belirlemek için kullanılır. Bu analiz, insanların yeşil alanlara erişebilme kapasitelerinin artırılmasına yönelik politika ve stratejilerin oluşturulmasına yardımcı olur. Buffer analizinde kullanılan formül, tampon mesafesi (d) ve veri katmanındaki özelliklerin geometrisine bağlı olarak farklı şekillerde hesaplanır. Örneğin, bir nokta veri kümesi için tampon analizi yaparken, tampon alanı dairesel bir şekilde hesaplanır [33] ve aşağıdaki formül kullanılır (Eşitlik 1):

$$A = \pi * d^2 \quad (1)$$

Burada, A tampon alanını ve d tampon mesafesini temsil eder. Başka bir örnek olarak, bir çizgi veri kümesi için tampon analizi yaparken, tampon alanı çizginin sağ ve solundaki alanı kapsayacak şekilde hesaplanır ve aşağıdaki formül kullanılır (Eşitlik 2):

$$A = (d * 2) * L \quad (2)$$

Burada, A tampon alanını, d tampon mesafesini ve L çizginin uzunluğunu temsil eder.

Yöntem kullanımı ve uygulamasının basit olması en temel avantajıdır. Yerleşim planlamalarında, bir yerin ideal konumunun belirlenmesi veya mevcut bir yerleşim yerinin genişletilmesi gibi uygulamalarda kullanılmasında ya da belirli bir konumun çevre alanlarına erişilebilirliğini değerlendirilmesi

gibi planlama, karar verme ve erişilebilirlik analizlerinde sıklıkla tercih edilen kullanışlı bir yöntemdir. Yöntem, basit modelleme tekniği kullandığından, analiz uygulanırken yerleşim yeri ve alanların karmaşıklığı dikkate alınmaz. Arazi topografyası, yol kalitesi, trafik koşulları gibi temel etkilere bağımsız olarak analiz edildiğinden yöntem tek boyutludur. Bu anlamda da yöntem, kullanıcıya bazı dezavantajlar sunmaktadır.

## 2.3. Network (Ağ) Analizi

Coğrafi veriler üzerinde yerel ve uzak alanlardaki yollar, yürüyüş yolları, tren hatları, vb. Gibi ulaşım ağlarını analiz etmek için kullanılan bir işlemdir. Bu işlem, özellikle lojistik yönetimi, araç rotalama, acil durum hizmetleri, servis ağı hizmetleri ve askeri planlama gibi birçok farklı disiplinde kullanılan çok yönlü bir araçtır [34]. Bir ağ üzerindeki yolların ve bağlantıların hesaplanmasını içerir ve buradaki düğümler ve aralarındaki bağlantılar arasındaki ilişkileri inceleyen bir yöntemdir. Bu ilişkileri görselleştirme ve nicel olarak analiz etme yoluyla, ağın yapısı ve davranışı hakkında bilgi edinilebilir.

Network analizi için kullanılan en temel formül, düğüm derecesi (node degree) formülüdür (Eşitlik 3). Bu formül, bir düğümün diğer düğümlerle kaç kez bağlantı kurduğunu hesaplamak için kullanılır. Eğer bir düğümün k bağlantısı varsa, o düğümün derecesi k olarak tanımlanır. Matematiksel olarak, düğüm derecesi formülü şu şekildedir [35]:

$$k_i = \sum_j a_{ij} \quad (3)$$

Burada  $k_i$ , i. düğümün derecesidir,  $a_{ij}$  ise i. ve j. düğümlerinin bağlantılı olup olmadığını gösteren bir 0-1 matris elemanıdır.  $\sum$  sembolü toplama işlemini ifade eder ve j, tüm diğer düğümleri temsil eder.

Bu formül sayesinde, ağda bulunan her bir düğümün derecesi hesaplanabilmektedir. Derece, bir düğümün önemini belirlemek için kullanılan bir ölçüttür. Örneğin, daha yüksek dereceli düğümler ağda daha merkezi bir konumda yer alırlar ve dolayısıyla daha önemli bir rol oynarlar. Ayrıca, düşük dereceli düğümler daha çok ağın çevresinde bulunur ve ağın genel bütünlüğüne daha az katkı sağlamaktadırlar. Buffer analizi ve Network analizi arasındaki en temel fark, Buffer analizinde özelliklerin bir mesafeye göre genişletilmesi ve alanların belirlenmesi, Network analizinde ise yol ağının optimize edilmesi ve ulaşım planlamasının yapılmış olmasıdır. Ancak bazı durumlarda, tampon analizi ve ağ analizi birlikte kullanılarak, örneğin bir yoldan belirli bir mesafedeki alanların ulaşılabilirliğinin belirlenmesi gibi analizler yapılabilir. Her iki analiz türünde de ana girdi parametresi mesafedir.

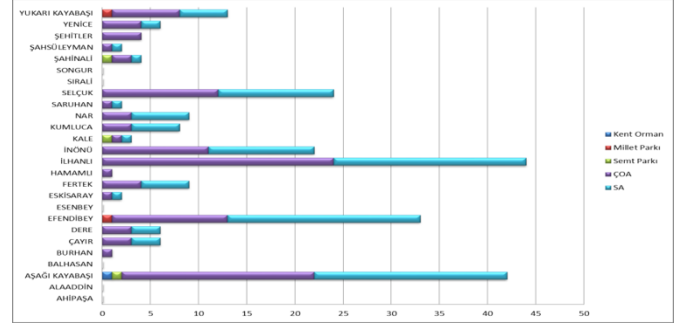
Network analizi, karmaşık ilişkileri ve etkileşimleri anlamamıza yardımcı olan güçlü bir araçtır, ancak doğru veri, modelleme yetenekleri ve analitik becerilere sahip olunması gerekmektedir. Analiz süreci Buffer analizine göre daha karmaşıktır. Bu sebeple, analizin tüm hatlarıyla incenip, dikkatli bir şekilde uygulanması ve sonuçlarının yorumlanması gerekmektedir.

## 3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada öncelikle aktif yeşil alanlar için mekânsal yeterlilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Niğde kent merkezine ait 26 adet mahalle içerisindeki aktif yeşil alanlar sayısallaştırılarak ArcGIS 10.8 yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Aktif yeşil alan olarak SA, ÇOA ve SPA kullanılmıştır. Aktif yeşil alan verilerinin tamamı Niğde Belediyesi Park Bahçe Müdürlüğü'nce temin edilmiştir (Tablo 2). Mekânsal yeterlilik analizleri için mahalle alanı ( $m^2$ ), mahalle nüfus verileri ve mevcut aktif yeşil alanların yüzölçümleri oranlanarak mahalle

başına düşen yeşil alan miktarları tespit edilmiştir. Bu sayede aktif yeşil alanların yönetmelikte yer alan standartlara uygunluğu ve mekânsal yeterlilikleri belirlenmiştir.

Aktif yeşil alan tanımı içerisinde kullanılan SA, ÇOA ve SPA uygulama alan sınırı içerisinde toplam 954.134 m<sup>2</sup>'lik bir alana sahiptir. Toplam 26 mahalle içerisinde 118 adet ÇOA, 117 adet SA, 4 adet SP, 1 adet Kent Ormanı (KO) ve 2 adet Millet Parkı (MP) bulunmaktadır. Kentte en fazla ÇOA sahip mahalle 24 ve 20 adet çocuk oyun alanı ile İlhanlı ve Aşağıkayabaşı mahalleleridir. Kentin bazı mahallelerinde (Esenbey, Sıralı, Songur, Şehitler, Ahipaşa, Alaaddin ve Balhasan Mahallesi) hiç ÇOA bulunmamaktadır. Spor alanı bakımından toplam 20 adet (spor aleti ve spor sahası) ile en fazla alana sahip olan mahalleler Aşağıkayabaşı, İlhanlı ve Efendibey Mahalleridir (Şekil 3).



Şekil 3. Niğde ili kent merkez mahallelerinde bulunan aktif ve yeşil alan sayılarının grafiksel gösterimi

Figure 3. Graphical representation of the number of active and green areas in the central neighbourhoods of Niğde province

Tablo 2. Mevcut aktif yeşil alan verileri

Table 2. Existing active green area data

No	Mahalle adı	Mahalle Alanı (m <sup>2</sup> )	Nüfus Verisi	Mevcut aktif yeşil alanlar			Toplam Yeşil alan (m <sup>2</sup> )	Mahalle başına düşen Yeşil alan (%)	Kişi başına düşen (m <sup>2</sup> )
				Mahalle/ Semt Parkı (Adet)	Çocuk Oyun Alanı (Adet)	Spor Alanı (Adet)			
1	Ahipaşa	23591.30	255,00	-	-	-	-	-	-
2	Alaaddin	38543.48	51,00	-	-	-	-	-	-
3	Aşağı Kayabaşı	7610280.20	36,76	2 SP	20	12 SA 8 SS	97,48	1.28	0.48
4	Balhasan	25068.03	237,00	-	-	-	-	-	-
5	Burhan	221699.00	1,49	-	1	-	3,91	1.76	0.67
6	Çayır	186017.45	1,31	-	2	1 SA 2 SS	26,18	14.07	0.71
7	Dere	468456.79	6,82	-	3	2 SA 1 SS	10,08	2.15	1.46
8	Efendibey	15125287.10	23,99	1 MP	12	9 SA 11 SS	292,21	1.93	0.16
9	Esenbey	51422.87.00	930,00	-	-	-	-	-	-
10	Eskisaray	155787.79	2,51	-	1	1 SA	1,84	1.18	1.61
11	Fertek	19276522.20	8,87	1 KO	4	4 SA 1 SS	225,70	1.17	0.05
12	Hamamlı	373442.95	191,00	-	1	-	340,00	0.09	0.05
13	İlhanlı	35106167.60	21,67	-	24	13 SA 7 SS	77,94	0.22	0.06
14	İnönü	1792459.35	6,86	-	11	8 SA 3 SS	43,00	2.40	0.38
15	Kale	56456.76	142,00	1 SP	1	1 SA	27,00	47.82	0.25
16	Kumluca	1571991.80	1,78	-	3	3 SA 2 SS	5,94	0.38	0.11
17	Nar	425550.13	3,17	-	4	3 SA 3 SS	14,27	3.35	0.74
18	Saruhan	61025.65	920,00	-	1	1 SA	1,33	2.18	1.51
19	Selçuk	12737045.30	21,84	-	12	8 SA 4 SS	51,33	0.40	0.17
20	Sıralı	63467.44	736,00	-	-	-	-	-	-
21	Songur	30827.59	420,00	-	-	-	-	-	-
22	Şahinalı	1378953.47	7,46	1 SP	2	1 SA	9,38	0.68	0.54
23	Şahsüleyman	154201.29	4,09	-	1	1 SA	2,35	1.53	2.65
24	Şehitler	208336.65	3,28	-	4	-	2,04	0.98	1.58
25	Yenice	299559.40	5,68	-	4	2 SA	10,40	3.47	1.90
26	Yukarı Kayabaşı	2605512.41	5,04	1 MP	7	3 SA 2 SS	51,40	1.97	0.19
<b>Toplam</b>		<b>100047674</b>	<b>166511</b>	<b>7</b>	<b>118</b>	<b>73 SA/44 SS</b>	<b>954134</b>	<b>0.95</b>	<b>5.3</b>

SP:semt parkı, MP: Millet parkı, KO:kent ormanı, SA:spor aleti, SS:spor sahası



2014 yılında yayınlanan 29030 sayılı Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliği madde 11 ve Ek-2 tablosuna göre mekânsal standartlar güncellenerek kişi başına düşen aktif açık yeşil alan miktarı 10 m<sup>2</sup> olarak yenilenmiştir (Tablo 3). Farklı nüfus gruplarında asgari sosyal ve teknik altyapı alanlarına ilişkin standartlar ve asgari alan büyüklükleri tablosunda geçen Çocuk bahçesi, park, meydan, semt spor alanları, botanik parklar, mesire ve rekreasyon alanları 0-75.000 arası nüfusa sahip yerleşim yerleri için kişi başına düşen yeşil alan miktarı 10 m<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. İl sınırı bütününde yapılan planlamalarda ise hayvanat bahçesi, kent ormanı, ağaçlandırılacak alan, fuar, panayır ve festival alanları ve hipodromlar için kişi başına düşen aktif ve yeşil alan miktarı ise 5 m<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Ayrıca yeşil alanlar için etki alanının (erişilebilirlik mesafesi) 500 metre yürüme mesafesi (yaya) olduğu belirtilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda 26 mahalle içerisinde mekânsal yeterlilik bakımından sadece 2 adet mahallenin yönetmelikte yer alan yeşil alan standartlarına uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu mahalleler kişi başına düşen aktif yeşil alan oranı 47.82 ile Kale Mahallesi ve 14.07 ile Çayır Mahallesi'dir. Geri kalan 24 mahallenin 4 m<sup>2</sup>'nin altında olduğu ve standart normunun çok

altında kaldığı gözlemlenmiştir. Çalışmada yeşil alan yoğunluğu ArcGIS 10.8 yazılımı kullanılarak 3 temel sınıfta haritalandırılmıştır (Şekil 4).

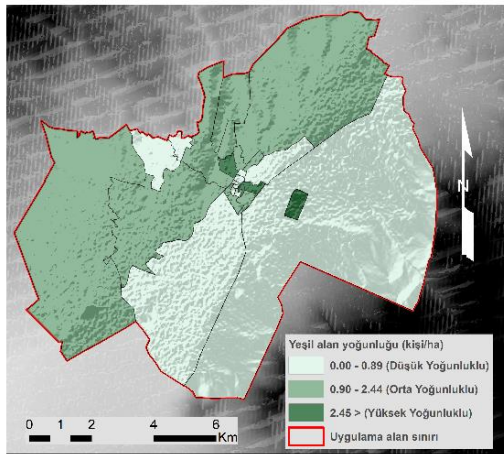
Haritaya göre 0.00-0.89 (kişi/ha) 'Düşük yoğunluklu', 0.90-2.44 (kişi/ha) 'Orta yoğunluklu', 2.45 ve üzeri (kişi/ha) 'Yüksek yoğunluklu' alanları göstermektedir. Bu dağılıma göre 11 mahallenin yüksek yoğunluklu alan olduğu ve kalan 15 mahallenin ise düşük yoğunluklu mahalle olduğu değerlendirilmiştir.

Aktif yeşil alanlarında içerisinde bulunduğu servis ya da hizmet alanları, özellikle kamu hizmeti veren yerler, birçok insanın erişimine açık olan yerlerdir ve mekânsal erişilebilirlik açısından özellikle önemlidirler. Çalışmanın ikinci bölümünde Niğde ili kent merkezi içerisinde yer alan aktif yeşil alanların mekânsal erişilebilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm için öncelikle tüm aktif yeşil alan verisi sayısallaştırılarak yazılımda işlenmiştir (Şekil 5). Bu amaçla 26 mahalleye ait 118 adet ÇOA, 117 adet SA, 4 adet SPA, 1 adet KO ve 2 adet MP Alanı olmak üzere toplam 242 yeşil alan verisi noktasal biçimde vektör veri modeli formatında analize hazır hale getirilmiştir.

**Tablo 3.** Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliği EK-2 tablo [36]

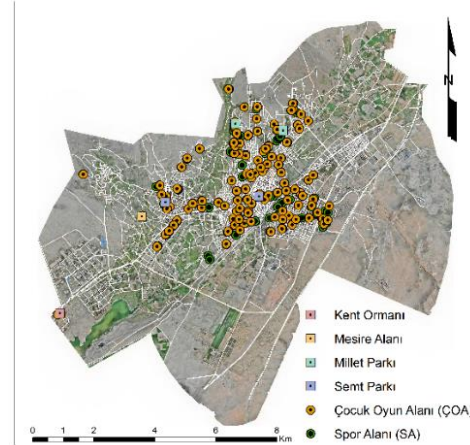
**Table 3.** Spatial Plans Construction Regulation Annex-2 table [36]

EK-2 TABLO		FARKLI NÜFUS GRUPLARINDA ASGARİ SOSYAL VE TEKNİK ALTYAPI ALANLARINA İLİŞKİN STANDARTLAR VE ASGARİ ALAN BÜYÜKLÜKLERİ TABLOSU							
NÜFUS GRUPLARI		0 - 75.000		75.001- 150.000		150.001 - 500.000		501.000 +	
ALTYAPI ALANLARI		m <sup>2</sup> /kişi	Asgari Birim Alan (m <sup>2</sup> )	m <sup>2</sup> /kişi	Asgari Birim Alan (m <sup>2</sup> )	m <sup>2</sup> /kişi	Asgari Birim Alan (m <sup>2</sup> )	m <sup>2</sup> /kişi	Asgari Birim Alan (m <sup>2</sup> )
SOSYAL AÇIK VE YEŞİL ALANLAR	Çocuk Bahçesi	10,00		10,00		10,00		10,00	
	Park								
	Botanik Parkı								
	Hayvanat Bahçesi								
	Mesire Yeri								
	Rekreasyon								



**Şekil 4.** Yeşil alan yoğunluğu

**Figure 4.** Green area density

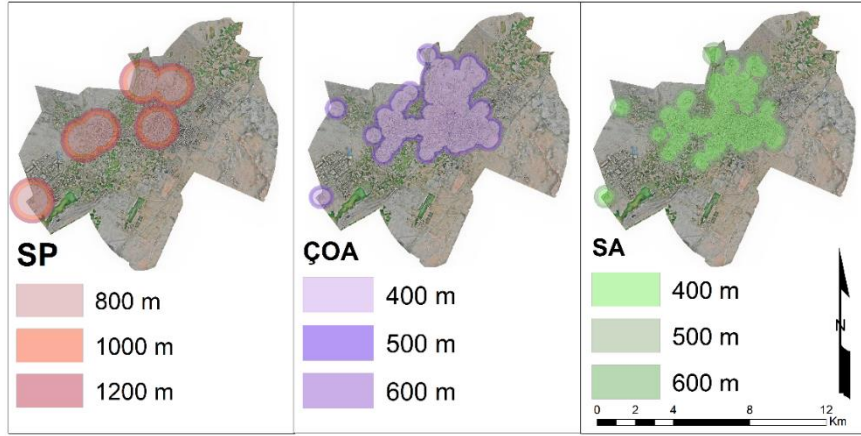


**Şekil 5.** Niğde ili kent merkezi içerisinde yer alan aktif yeşil alan verileri sayısal gösterimi

**Figure 5.** Numerical representation of active green area data in the city centre of Niğde province

Mekânsal erişilebilirlik analizinde farklı analiz teknikleri kullanılmıştır. İlk olarak mesafe üzerinden analizler yapan Buffer analizi uygulanmıştır. Buffer analizi mekânsal etki belirlemede sıklıkla kullanılan diğer analiz türlerine göre basit bir yöntemdir. Yöntem bölgenin topografyasından, arazi modelinden bağımsız olarak uygulanır. Çalışmada aktif yeşil alanların hizmet eki alanı olarak Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliği Dördüncü Bölümde yer alan Mekânsal Planların Yapımına Dair Esaslar hususunda Yürüme mesafeleri, Madde 12(2)' e göre "İmar planlarında; çocuk bahçesi, oyun alanı, açık semt spor alanı, aile sağlık merkezi, kreş, anaokulu ve ilkokul fonksiyonları takriben 500 metre, ortaokullar takriben 1.000 metre, liseler ise takriben

2.500 metre mesafe dikkate alınarak yaya olarak ulaşılması gereken hizmet etki alanında planlanabilir" [36] şeklindedir. Yasal standartlar gereği etki alanının belirlenmesinde 500 metre temel alınarak multiple buffer seçeneği ile mesafeler 400 m, 500 m ve 600 m olarak seçilmiştir. Kent orman ve Millet Bahçelerinin yer aldığı Semt/Mahalle Parkları için hizmet alanı ise 1000 m temel alınarak multiple buffer seçeneği ile mesafeler 800 m, 1000 m ve 1200 m olarak seçilmiştir. Yapılan analiz sonuçları Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. Buffer analizi sonuçları (SP:Semt parkı, ÇOA:Çocuk oyun alanı, SA:Spor alanı)

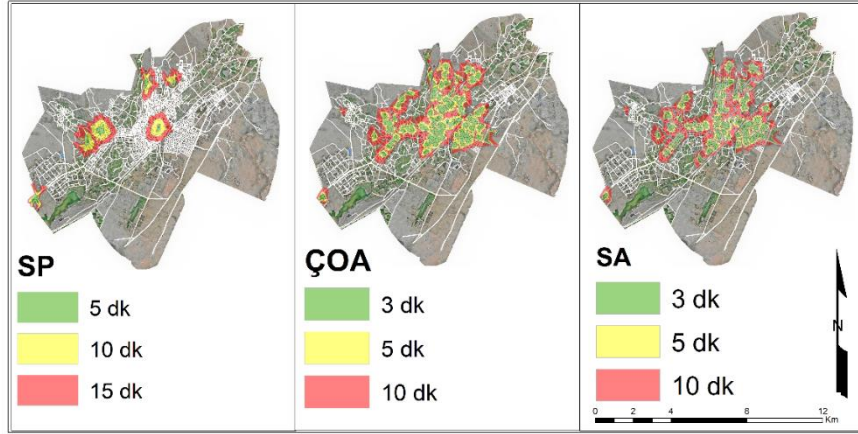
Figure 6. Buffer analysis results (SP: Neighbourhood park, COA: Children's playground, SA: Sports field)

Mekânsal erişilebilirlik analizlerinden ikinci yöntem olarak Network analizi tekniği kullanılmıştır. Network analiz, bir ağ üzerindeki yolların ve bağlantıların hesaplanmasını içerir ve buradaki düğümler ve aralarındaki bağlantılar arasındaki ilişkileri inceleyen bir yöntemdir. Çalışmada analiz işlemine kullanılacak öncelikli veri seti ağ verilerinin oluşturulmasıdır. Bu kapsamda ArcGIS 10.8 yazılımı kullanılarak Niğde kent merkezine ait tüm yol ağı sayısallaştırılmıştır. Oluşturulan yol ağı verileri biçimlendirilerek yol türü, kavşaklar, trafik akış yönleri, hız limitleri ve diğer ağ özellikleri veri setine entegre edilmiştir. Ağ analizinde kullanılan ulaşım ağı, 1.derece, 2. Derece ve 3. Derece olarak katagorilendirilmiştir. Yol ağlarına göre ortalama hızlar sırasıyla 70 km/s, 50km/s ve 30 km/s olarak yol derecesine uygun olarak atanmıştır. Yaya yürüme süreleri belirlenirken ortalama hızlarına göre 3, 5, 10 ve 15 dakika olarak kat edebileceği mesafeler hesaplamalarda kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan 3 tip yeşil alan için gerçekleştirilen Network analiz Şekil 7'de ki gibidir. Aktif yeşil alanlar için gerçekleştirilen mekânsal erişilebilirlik analizlerini değerlendirmek adına iki yöntem sonuçları karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır (Şekil 8).

Buffer analiz tekniği ile gerçekleştirilen işlemler, Network analiz tekniğine göre daha az veri seti kullanılması sebebiyle basit ve sezgisel olarak gerçekleştirilmiştir. Bu teknikte bölgenin

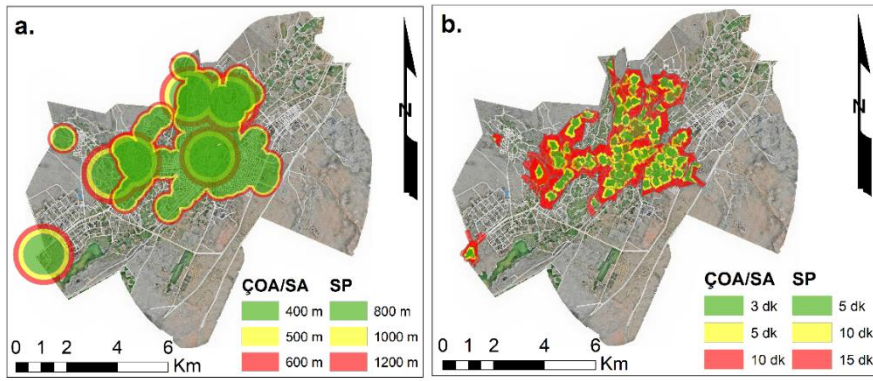
topografik yapısı, yol mevcudiyeti gibi etkenler dikkate alınmadan mesafeler belirlenmiştir. Network analiz tekniğinde ise daha karmaşık bir planlama söz konusudur. Bölgenin coğrafi şartları, erişilecek yolların yönü, şerit sayısı, yüksekliği, hız faktörü gibi çoklu girdi parametresini içermesi sebebiyle yapılan analiz işlemi daha karmaşık ve nesnel bir analiz türünü içermektedir. Buffer analizi sadece mesafelere dayalı olması sebebiyle veri toplama süreci ve işlenmesi oldukça hızlı gerçekleştirilir. Network analizinde çoklu girdi parametreleri kullanılması sebebiyle bu analiz türü için gerekli olan verilerin toplanması ve analizi daha zor ve zaman alıcı olarak gerçekleştirilmiştir. Buffer analiz yönteminde, çevrilen alanlar bir çember şeklinde, yol gibi arazinin topografik etmenlerinden bağımsız olarak belirlenmesi sebebiyle elde edilen sonuçların teknik açıdan yeterli doğruluğu yansıtmadığı tespit edilmiştir. Görsel tekniği de bu anlamda zayıf kalmıştır. Network analizinde işe standart geometrik şekiller yerine ulaşım ağını ve bunun parametrelerini baz alarak yol hattı boyunca analizler gerçekleştirilmiştir. Görsel açıdan da daha doğru sonuç ürün sunmaktadır. İki yöntem tüm yönleriyle kapsamlı olarak değerlendirildiğinde ve sonuç ürünler karşılaştırıldığında Network analiz tekniğinin daha kapsamlı ve gerçekçi sonuçlar sunduğu tespit edilmiştir.





Şekil 7. Network analizi sonuçları (SP:Semt parkı, ÇOA:Çocuk oyun alanı, SA:Spor alanı)

Figure 7. Network analysis results (SP: Neighbourhood park, COA: Children's playground, SA: Sports field)



Şekil 8. Analiz sonuçlarının karşılaştırması, a;Buffer analiz sonuçları gösterimi, b;Network analiz sonuçları gösterimi

Figure 8. Comparison of analysis results, a;Buffer analysis results display, b;Network analysis results display

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışma, Niğde kent merkezi örneğinde sürdürülebilir bir kent için önemli olan aktif yeşil alanların mevcudiyeti ve mekânsal olarak tasarlanmasının önemine dikkat çekmektedir. Analiz sonuçları, kent merkezindeki çoğu mahallede aktif yeşil alanların yetersiz olduğunu ve yasal yönetmelikte belirtilen kişi başı 10 m<sup>2</sup>/kişi standardının yakalanamadığını göstermektedir.

Niğde kapsamında yapılan yeşil alan çalışmaları da bulunan sonucu desteklemektedir. [37], kent merkezinde yaptıkları yeşil alan yeterliliği değerlendirmesinde 2009-2019 yılları arasında geçen 10 sene içerisinde yapay yüzey (yapı) alanlarının 2 kat arttığı yeşil alan miktarlarının da yarı yarıya azaldığını belirlemişlerdir. [38], çalışmada orta ölçekli bir kent olan Niğde kent merkezinin artan nüfusa paralel olarak yeni konutların artması yerleşim alanını devamlı olarak genişletmekte olduğunu, bu durumun aktif yeşil alanları olumsuz etkilediğine hatta ekolojik yapıya da büyük zarar verdiğini belirlemiştir. [39], çalışmalarında kent merkezinin 589 276.01 m<sup>2</sup>'lik alana sahip 177 adet aktif yeşil alan olduğu ve kişi başına 4.09 m<sup>2</sup> aktif yeşil alan düştüğü belirlenmiştir. Çalışma sonucunda kent merkezinde yer alan aktif yeşil alanların yetersiz olduğu tespit edilmiş ve bu alandaki yeşil alanların nicel olarak artışlarını sağlamaları adına öneriler geliştirmiştir.

Bu çalışmanın önemli bir sonucu da mekânsal erişilebilirlik değerlendirmesi için Buffer ve Network analiz yöntemlerinin kullanılmasıdır. Bu yöntemlerin karşılaştırması yapılmış ve Network analiz tekniğinin daha kapsamlı ve gerçekçi sonuçlar sunduğu tespit edilmiştir. Gerçekleştirilecek mekânsal yeterlilik

analizlerinin tek boyutta kalmadan farklı metotlarla incelenmesi çalışmanın gerçekliğini artırmıştır.

Bu çalışmanın sonuçları, kent planlaması ve yönetimi için önemli bir referans noktası oluşturmaktadır. Sürdürülebilir kentlerin tasarlanması için, kentsel yeşil alanların mevcudiyeti ve mekânsal olarak tasarlanması gibi kritik fenomenlerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu çalışma, bu fenomenlerin Niğde kent merkezi örneğinde nasıl uygulandığını göstermektedir.

#### Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Teşekkür

Çalışmada kullanılan aktif yeşil alan verilerinin tedarikinde yardımlarını esirgemeyen Niğde Belediyesi Park ve Bahçeler Müdürlüğü'ne, ayrıca çalışmada kullanılan mahalle sınırları ve altlık ortofoto haritaların tedarikinde ise Niğde Belediyesi İmar ve Şehircilik Müdürlüğü'ne yardımları için teşekkürlerimizi sunarız.

#### Yazar katkılarının beyanı

Yazar 1, elde edilen verilerin analizini gerçekleştirmiş ve makalenin sonuçlarına ulaşmıştır. Buffer ve network analizleri üzerinden elde edilen sonuçları istatistiksel olarak değerlendirmiş, grafikler ve haritalar aracılığıyla etkili bir şekilde sunmuştur. Ayrıca, diğer yazarların metinleri üzerinde eleştirel

bir inceleme yaparak, metodoloji, sonuçlar ve önerilerle ilgili herhangi bir tutarsızlık veya iyileştirme alanını belirlemiştir. Aynı zamanda, makalenin genel akışını ve anlatısını güçlendirmek adına yazım sürecine de katkıda bulunmuştur.

Yazar 2, makalenin deney tasarımı ve veri toplama aşamalarına liderlik etmiştir. Buffer ve network analiz tekniklerini kentsel yeşil alanlar için uygulayabilmek adına uygun bir metodoloji belirlemiş ve bu metodoloji doğrultusunda saha çalışmalarını organize etmiştir. Yeşil alanların belirli özelliklerini, kullanıcı profilleri ve mekânsal veriler bu aşamada toplanmış, ayrıca bu verilerin nitel ve nicel analizleri için uygun yöntemler tasarlanmıştır.

Yazar 3, makalenin temel fikirlerini oluşturma aşamasında öne çıkmıştır. Kentsel yeşil alanların mekânsal yeterlilik ve erişilebilirlik analizi konseptini geliştirerek, literatür taramasıyla mevcut bilgileri değerlendirmiştir. Bu aşamada, kentsel planlama, yeşil alan tasarımı ve coğrafi bilgi sistemleri gibi farklı disiplinlerden gelen literatürü kapsayan bir genel bakış sağlamış ve çalışmanın temelini oluşturmuştur.

### Kaynaklar

- [1] Aksu, V., Ulu, F., 2004. Kentsel Mekanlarda Açık ve Yeşil Alanların Önemi ve Trabzon Kenti Ölçeğinde Değerlendirilmesi. Doğu Karadeniz Ormanlık Araştırma Enstitüsü, DKOYA Yayın No:21, Sayfa 76-86, Trabzon.
- [2] Akkemik, Ü., Alp, M. A., Sevgi, O., Ekşi, M. 2021. Kentsel Yeşil Alan Hesaplamasında Kullanılan Bazı Terimler Üzerine Kısa Bir Değerlendirme ve Öneriler. *Avrasya Terim Dergisi*, 9(3), 51-58.
- [3] Öztan, Y. 1968. Ankara şehri ve çevresi yeşil saha sisteminin peyzaj mimarisi prensipleri yönünden etüd ve tayini. Ankara Üniversitesi Basımevi.
- [4] Adigüzel, F., Doğan, M. 2020. Analysis of sufficiency and accessibility of active green areas in Cukurova. *Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences*, 6(2), 95-106.
- [5] Giridharan R, Lau SSY, Ganesan S, Givoni B. 2007. Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong. *Building and Environment (In Press)*.
- [6] Doygun, H., İltar, A. A. 2007. Kahramanmaraş Kentinde Mevcut ve Öngörülen Aktif Yeşil Alan Yeterliliğinin İncelenmesi. *Ekoloji Dergisi*, 16(65).
- [7] Türker, H. B., Atila, G. Kentsel Açık ve Yeşil Alanlarının Niceliksel Analizi ve İrdelenmesi: Uşak Kent Merkezi Örneği. *Kent Akademisi*, 15(4), 2070-2091. <https://doi.org/10.35674/kent.999451>.
- [8] Çepel, N., 1988. Peyzaj Ekolojisi. İ.Ü. Orman fakültesi Yayın No: 3510, İstanbul.
- [9] Grahn, P. ve Stigsdotter, U.A., 2003. Landscape planning and stress. *Urban forestry & urban greening*, 2(1), 1-18. <https://doi.org/10.1078/1618-8667-00019>.
- [10] Morancho, A. B., 2003. A hedonic valuation of urban green areas. *Landscape and urban planning*, 66(1), 35-41. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(03\)00093-8](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(03)00093-8).
- [11] Nowak, D.J., Crane, D.E., Stevens, J. C. 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening*, 4;115-123. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007>.
- [12] Heidt, V., Neef, M. 2008. Benefits of urban green space for improving urban climate. *Ecology, planning, and management of urban forests: International perspectives*, 84-96. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-71425-7\\_6](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-71425-7_6).
- [13] Haq, S. M. A., 2011. Urban green spaces and an integrative approach to sustainable environment. *Journal of Environmental Protection*, 2(5): 601-608
- [14] Buyadi, S.N.A., Mohd, W.M.N.W. ve Misni, A. 2013. Green spaces growth impact on the urban microclimate. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 105, 547-557. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.058>.
- [15] Tamosiunas, A., Grazuleviciene, R., Luksiene, D., Dedele, A., Reklaitiene, R., Baceviciene, M., Vencloviene, J., Bernotiene, G., Radisauskas, R., Nieuwenhuijsen, M. J. 2014. Accessibility and use of urban green spaces, and cardiovascular health: findings from a Kaunas cohort study. *Environmental health*, 13(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-13-20>.
- [16] WHO, 2017. Urban green spaces: a brief for action. p 11. <https://www.euro.who.int/en>
- [17] Gül, A., Dinç, G., Akın, T. ve Koçak, A. İ. 2020. Kentsel Açık ve Yeşil Alanların Mevcut Yasal Durumu ve Uygulamadaki Sorunlar. *Kent Araştırmaları Dergisi (Journal of Urban Studies) İdeal Kent, Kentleşme ve Ekonomi Özel Sayısı, Cilt Volume 11, Yıl Yorum 2020-3, 1281-1312, ISSN: 1307-9905 E-ISSN: 2602-2133 DOI:10.31198/idealkent.650461*
- [18] Tango, U., Topçu, M. 2021. Kentsel Donatı Alanlarının Erişilebilirlik Analizi: Mardin Kızıltepe Örneği. *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, 3(2), 104-115.
- [19] Zhang, J. 2021. How to accurately identify the underserved areas of peri-urban parks? An integrated accessibility indicator. *Ecological Indicators*. (122). <https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2020.107263>.
- [20] Gupta, K., Roy, A., Luthra, K., Maithani, S. 2016. GIS based analysis for assessing the accessibility at hierarchical levels of urban green spaces. *Urban Forestry & Urban Greening*, (18), 198-211. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.06.005>.
- [21] Fan, P., Xu, L., Yue, W., Chen, J. 2017. Accessibility of public urban green space in an urban periphery: The case of Shanghai. *Landscape and Urban Planning*, (165), 177-192. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.11.007>.
- [22] Wolff, M., Scheuer, S. Haase, D. 2020. Looking beyond boundaries: Revisiting the rural-urban interface of Green Space Accessibility in Europe. *Ecological Indicators*, (113), 106245. <https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2020.106245>.
- [23] Reyes, M., Páez, A., Morency, C. 2014. Walking accessibility to urban parks by children: A case study of Montreal. *Landscape and Urban Planning*, (125), 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.02.002>.
- [24] Koçan, N. 2012. Çocuk oyun alanlarının yeterliliği üzerine bir araştırma: Uşak kenti Kemalöz mahallesi örneği. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 28(4), 315-321.
- [25] Adigüzel, F., Balta, M. Ö. 2021. COVID-19 sürecinde kentsel açık ve yeşil alan erişilebilirliği: Uşak kenti örneği. *Türk Coğrafya Dergisi*, (79), 17-24. DOI: 10.17211/tcd.993130.
- [26] Koçan, N. 2021. Determination of urban sprawl on ecological network using edge analysis: a case study of Uşak (Turkey). *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 29(3), 187-199. DOI: 10.3846/jeelm.2021.14643.
- [27] Dursun, D., Güller, C. 2019. Relationship between child and urban space: accessibility and areal efficiency analysis of playgrounds in Erzurum. *Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University*, 10(1), 11-27. <https://doi.org/10.29048/makufebed.515261>.
- [28] Gerçek, D., Güven, İ. T. 2017. Kentlerde Yeşil Alanların Yeterlilik, Erişilebilirlik ve Bütünsellik Açısından Değerlendirilmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(2), 393-397. DOI: 10.21923/jesd.293177.
- [29] Gülçin, D. 2020. Yeşil Alanların Ekolojik Bağlantılılığının Mekânsal Zamansal Değerlendirilmesi: Manisa Örneği. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 5(4), 585-596. <https://doi.org/10.35229/jaes.794559>.
- [30] Grahn, P., Stigsdotter, U. A. 2003. Landscape planning and stress. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2(1), 1-18. DOI: 10.1078/1618-8667-00019.
- [31] Türkiye İstatistik Kurumu, TÜİK, istatistiksel veri portalı, "Türkiye Nüfus verileri", 2021, [www.tuik.gov.tr](http://www.tuik.gov.tr) (Erişim Tarihi: 02.03.2023)..
- [32] Kamacı Karahan, E. 2020. Stratejik Planlama Ekseninde Erişilebilirlik: Tampon ve Ağ Analizlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi . *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (1) , 335-349 . DOI: 10.28948/ngumuh.620361
- [33] ArcGIS Desktop, Proximity toolset, Buffer Analysis, 2023, <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/analysisstoolbox/buffer.htm> (Erişim Tarihi: 12.03.2023).
- [34] Geçen, R. 2019. Ağ Analizi Kullanılarak Acil Durumlarda İtfaiye Araçlarının Erişilebilirlik Analizi: Ceyhan (Adana) Örneği. *Ege Coğrafya Dergisi*, 28(2), 199-211.
- [35] Bovet, A., Makse, H. A. 2021. Centralities in complex networks. *arXiv preprint arXiv:2105.01931*.
- [36] Resmi gazete, 14/06/2014 tarih ve 30069 sayılı Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliği madde 11 ve Ek-2 tablo, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2014/06/20140614-2.htm> (Erişim Tarihi: 21.03.2023).
- [37] Erzurumlu, G. S., Şen, B. 2019. Green Area Requirement in Zoned Areas: The Case of Niğde City. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 7(sp3), 89-92. <https://doi.org/10.24925/turjav7isp3.89-92.3252>.
- [38] Olgun, R. 2019. Orta ölçekli kentler için kentsel yeşil alan sistem önerisi: Niğde Kenti Örneği. *Artium*, 7(1), 57-69.
- [39] Olgun, R., Yılmaz, T. 2019. Kentsel yeşil alan varlığının Niğde kenti örneğinde değerlendirilmesi. *Mediterranean Agricultural Sciences*, Cilt. 32(1), s. 11-20. <https://doi.org/10.29136/mediterranean.486732>.



RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALESI

## Enhancing Suspension System Control Performance Using PID Controller Incorporated Low-Pass Filter Optimized with Genetic Algorithm

### Genetik Algoritma ile Optimize Edilmiş Alçak Geçiren Filtre içeren PID Denetleyici Kullanılarak Süspansiyon Sistemi Kontrol Performansının Artırılması

İbrahim Şenaslan , Boğaç Bilgiç

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Istanbul University-Cerrahpaşa, Avclar Kampüsü, 34320, Avclar, Istanbul, TÜRKİYE  
Corresponding Author / Sorumlu Yazar\*: bilgiçbogac@gmail.com

#### Abstract

In this study, a filter has been incorporated to enhance the performance of the PID controller, which is commonly used for controlling suspension systems. While designing this filter, the inspiration has been the low-pass filter used in sliding mode controllers to prevent chattering and uncertainties in system parameters, unlike conventional PID controller filters. Additionally, the filtered force value was combined with the force value obtained from the PID controller using an equation based on a coefficient, and filter coefficients were optimized through genetic algorithms. As a result of the optimization, the designed controller was simulated for various road inputs that could be encountered, and results were obtained. By comparing the results obtained with a PID controller without a filter and without a controller, the performance of the designed controller is clearly shown according to IAE and ISE criteria. Robustness of the controller was evaluated under varying mass conditions and its performance was given as a table.

**Keywords:** Filter PID, Genetic Algorithm, Active Suspension Systems, Robust Control

#### Öz

Bu çalışmada, süspansiyon sistemlerinin kontrolü için yaygın olarak kullanılan PID kontrolcünün performansını arttırmak için bir filtre eklenmiştir. Bu filtre tasarlanırken, klasik PID kontrolcü filtrelerinden farklı olarak, kayan kipli kontrolcülerde çatırtıyı ve sistem parametrelerindeki belirsizlikleri önlemek için kullanılan düşük geçiren filtreden esinlenilmiştir. Ayrıca filtrelenen kuvvet değeri, katsayıya dayalı bir denklem kullanılarak PID kontrolcünden elde edilen kuvvet değeri ile birleştirilmiş ve filtre katsayıları genetik algoritma aracılığıyla optimize edilmiştir. Yapılan optimizasyon sonucunda tasarlanan kontrolcü, karşılaşılabilecek çeşitli yol girişleri için simule edilerek sonuçlar elde edilmiştir. Kontrolcüsüz ve filtersiz PID kontrolcü ile elde edilen sonuçlar kıyaslanarak, tasarlanan kontrolcünün başarımı IAE ve ISE kriterlerine göre açıkça gösterilmiştir. Kontrolcünün gürbüzlüğü değişen kütle koşulları altında değerlendirilmiş ve performansı tablo halinde verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Filtreli PID, Genetik Algoritma, Aktif Süspansiyon Sistemleri, Gürbüz Kontrol

#### 1. Introduction

Currently, the widespread use of automobiles has resulted in an increasing importance placed on suspension systems. Suspension systems offer significant advantages in terms of both road grip and vehicle comfort, thereby rendering their use inevitable for automobiles [1]. This has led to the emergence of new research areas aimed at optimizing and improving suspension systems [2,3]

In general, suspension systems link the vehicle body and wheels, allowing for relative movement between them [4]. Such systems are classified into three categories in the literature: passive, semi-active, and active suspension systems [5,6,7]. While passive systems were utilized in earlier days, they have become inadequate in terms of comfort with the advent of semi-active and active systems [8]. Semi-active systems are more effective than passive systems but consume less energy than active systems. Active systems, on the other hand, offer superior driving

experiences but are less energy-efficient than semi-active systems [9].

A good suspension system should control both driving comfort and handling parameters in a balanced manner [10]. Hence, the selected controller should be carefully chosen. Commonly known controllers in the suspension field include Fuzzy Logic Controller (FLC) and Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers, which can be applied in different fields [11,12]. In addition to controller selection, optimization of the controller is also essential. To achieve this, an optimization method suitable for the model should be selected. The most common optimization methods include Particle Swarm Optimization (PSO) and Genetic Algorithm (GA) methods. Compared to PSO and GA, the Ziegler-Nichols method is faster but experimental [13,14,15]. Apart from driving safety and comfort, the applications of active control systems in suspensions are also encountered in the defense industry [16].

Effective controller performance under changing and nonlinear conditions is crucial in real-world applications [17]. The PID controller's linear structure renders it non-robust, which is a significant drawback. Robustness is a crucial characteristic of a good controller because mass and force in the vehicle continually vary due to the variable weight of passengers and acceleration in the direction of gravity on bumps. As a result of the added filter and optimizations, the PID controller's robustness feature was enhanced, and its performance improved against varying mass, effectively endowed the PID controller with enhanced robustness, a vital attribute for its performance in the presence of changing and dynamic conditions. Furthermore, when PID is used alone, it achieves stability in a matter of seconds; however, the addition of the filter has expedited this process significantly. The introduction of the filter has not only reduced oscillations but has also led to a faster stabilization.

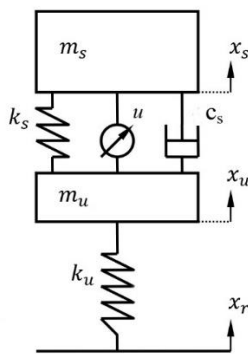
The significance of this enhancement goes beyond the realm of control theory. In the context of suspension systems, which play a pivotal role in automotive engineering, this improved controller performance carries substantial implications. Suspension systems are responsible for maintaining vehicle stability, comfort, and handling, especially when subjected to varying loads and terrain conditions [18,19]. The ability of the PID controller, bolstered by the added filter, to respond more effectively to fluctuations in mass and external forces aligns with the fundamental objectives of suspension systems. By achieving a faster and more precise response to these variations, the controller contributes to a smoother and safer ride, reducing wear and tear on vehicle components and enhancing overall driving experience. Thus, the enhanced robustness of the PID controller holds great promise in advancing the field of suspension system design and performance, offering potential benefits for a wide range of automotive applications.

In this study, a quarter car model was utilized, and the active suspension system was controlled by a PID controller incorporating a low-pass filter. The PID controller coefficients were determined using the Ziegler-Nichols method, and optimization of the filter and adaptation part was carried out using the Genetic Algorithm. The results indicate that the performance of the PID controller was significantly enhanced through the addition of the filter and adaptation parts.

**2. Material and Method**

**2.1. Mathematical model**

In vehicle modeling, three main models are typically used: the quarter car, half car, and full car models. The quarter car model was selected for this study to demonstrate the impact of the filter in a straightforward, simplified, and easy-to-understand manner.



**Figure 1.** Physical model of quarter car

$$m_s \ddot{x}_s + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) + k_s (x_s - x_u) = u \tag{1}$$

$$m_u \ddot{x}_u + c_s (\dot{x}_u - \dot{x}_s) + k_s (x_u - x_s) + k_u (x_u - x_r) = -u \tag{2}$$

The physical model of a quarter car is shown in Figure 1. In this figure; The unsprung mass is denoted by  $m_u$ , the sprung mass by  $m_s$ , the damping coefficient of the suspension system by  $c_s$ , the coefficient of wheel spring by  $k_u$ , and the coefficient of suspension spring by  $k_s$ . The specific values for these parameters are provided in Table 1.

**Table 1.** Quarter car suspension parameters

Parameter	Symbol	Value (Unit)
Quarter body mass	$m_s$	290 (kg)
Suspension spring coefficient	$m_u$	16812 (N/m)
Damping coefficient	$c_s$	1000 (Ns/m)
Wheel mass	$k_u$	59 (kg)
Wheel spring coefficient	$k_s$	190000 (N/m)

To simulate real-life scenarios as closely as possible, three distinct types of road inputs were utilized in this study. In addition to the continuous ISO input, step and bump inputs were implemented to assess how the system responds to sudden disturbances. This approach was employed to ensure that the study accounted not only for permanent effects, but also for any potential road irregularities that could arise. The ISO path used in the study consists of 3 different qualities. The first quality is the A-B quality highway, which is frequently used in cities. The other two grades were chosen as B-C and C-D to test the study in more demanding conditions.

$$G_d(n) = G_d(n_0) * \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w} \tag{3}$$

Where,  $G_d$  is displacement PSD in  $m^3$ ,  $n$  is the spatial frequency,  $n_0 = 0.1$  cycles/m in the reference spatial frequency and  $w$  is the exponent of the fitted PSD.

Three different road qualities mentioned in Table 2 were applied at 10 second intervals so that all of them could be tested. Thus, the continuity on the road was not disturbed and three different situations as road entrance were examined.

**Table 2.** ISO 8608 thresholds of the first three classes (A-C) [21,22]

ISO 8608 class	$G_d(n)(10^{-6} * m^3)$
A (very good)	<32
B (good)	32-128
C (average)	128-512

Step and bump entrances, where we can examine possible distortions on the road, unlike the continuous road, were also examined. At the step entrance, the behavior of the vehicle after climbing the 0.05m high step was observed. At the bump entrance, two short-term impacts, the first of which is 0.035m high and the second 0.025m high, were applied to the vehicle and thus the resistance of the study to sudden impacts was also tested.

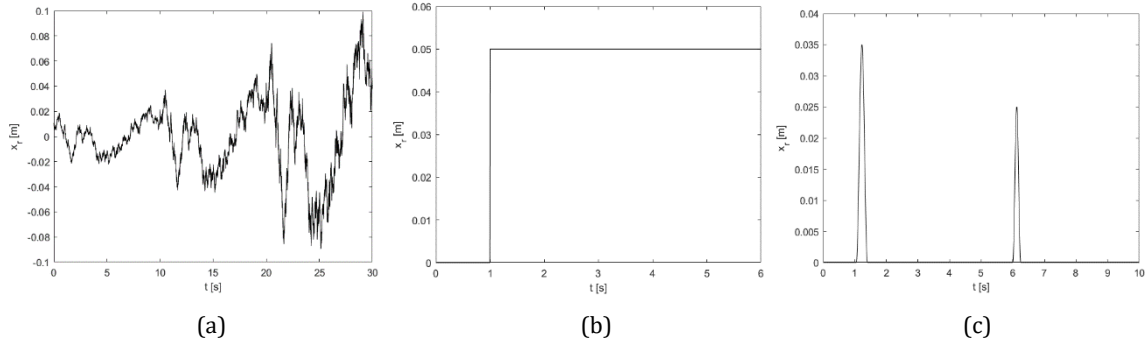


Figure 2. All road profiles (a) ISO (b) Step (c) Bump

2.2. Control algorithm

To enhance the performance of the system, appropriate control algorithms were chosen and optimized. A low-pass filter was integrated into the PID controller, and this filter was optimized using a genetic algorithm. Furthermore, the integration process itself was optimized using a genetic algorithm as well.

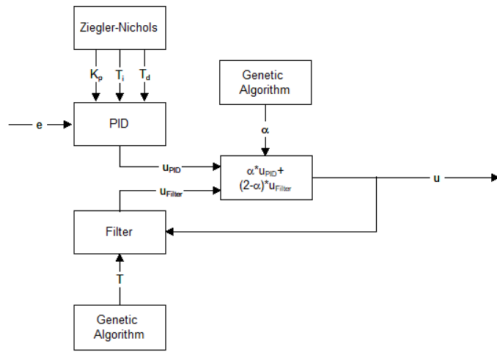


Figure 3. PID incorporated filter optimized GA

$$e = x_{sref} - x_s \tag{4}$$

$$x_{sref} = 0 \tag{5}$$

Utilizing an adaptive  $\alpha$  value in lieu of a constant integration of the filter and PID controller enhanced the agility of the controller and amplified its efficacy.

$$u = \alpha * u_{PID} + (2 - \alpha) * u_{Filter} \tag{6}$$

The optimal value of the  $\alpha$  was determined as 1.487 for the current system through the utilization of a genetic algorithm.

PID controller is one of the most common controllers used in suspension systems. It takes a selected parameter in the system as an error and multiplies them with a proportional coefficient after taking the error itself, its integral and its derivative. The resulting force enters the system as an input and the error is tried to be minimized. In this study, the position of the sprung mass was taken as the error parameter.

$$u_{PID}(t) = K_p * (e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) \tag{7}$$

In this equation;  $K_p$  represents proportional coefficient;  $T_i$  represents integral coefficient and  $T_d$  represents derivative coefficient. These coefficients should be chosen carefully to minimize the error.

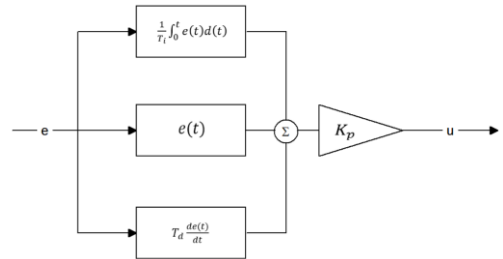


Figure 4. The block diagram of PID controller



Figure 5. The block diagram of Ziegler-Nichols method

The Ziegler-Nichols method is a commonly preferred technique in suspension systems for determining the optimal controller parameters. This method involves subjecting the controller to sustained oscillation at a non-zero reference level and subsequently deriving the PID coefficients based on the resulting amplitude and coefficients. In this study, the Ziegler-Nichols method was employed to determine the optimal PID coefficients.

$$u_{Filter}(s) = \frac{1}{\tau s + 1} u_{PID}(s) \tag{8}$$

In signal processing, using an averaging filter, especially a low-pass filter, is justified by the fact that the signal's fundamental characteristics are determined by its low frequencies, whereas high frequencies often reflect unaccounted dynamics.

To preserve the signal's slow component, the cutoff frequency of the low-pass filter must be chosen to be large enough while still removing high-frequency components. As a result, the filter's output tends towards the equivalent control, ensuring system stability. This approach eliminates the requirement for an accurate mathematical model of the system, thereby increasing the designed controller's practicality [23].

Unlike the empirical experimentation involved in the Ziegler-Nichols method, the Genetic Algorithm method relies on computational optimization to identify the optimal outcome within a defined range. To achieve this, the Genetic Algorithm establishes an objective function, which it endeavors to minimize based on its own predetermined criteria. Establishing an accurate goal function that aligns with the study is critical for optimization studies, as it ensures that the optimized results are aligned with the intended control objective.



In this study, IAE (Integral Absolute Error) and ISE (Integral Squared Error) criteria were used to determine the Objective Function. Acceleration and position, which are the two most important parameters for suspension systems, were chosen as the parameters to be used in these two criteria. However, since the values of the two parameters cannot be similar, a correction coefficient is used to ensure that their effects are the same.

$$G_1 = k * IAE_p + IAE_a \tag{9}$$

$$G_2 = k * ISE_p + ISE_a \tag{10}$$

$G_1$  and  $G_2$  represent Goal Functions,  $k$  represents the correction coefficient,  $IAE_p$  and  $ISE_p$  represents errors of position,  $IAE_a$  and  $ISE_a$  represents errors of acceleration. In order to determine the correction coefficient, the acceleration and position values according to the ISO input were taken into account. Since the distance between the extreme points is approximately 50 times, the correction coefficient was determined as 50.

Upon establishing the objective function to be optimized, the Filter and Adaptation coefficients were subsequently determined via the Genetic Algorithm (GA). The GA is a heuristic search algorithm inspired by the process of natural selection. In the context of this study, it was employed to fine-tune the controller parameters effectively.

The GA operates by creating a population of potential solutions, where each solution represents a set of coefficients for the filter and adaptation parts [24]. These coefficients are initially generated as random numbers within predefined bounds, effectively initializing the population [25]. Following this, the algorithm iteratively evaluates the fitness of each solution by assessing how well it aligns with the optimization objective. The fitness is determined based on the performance of the PID controller in reducing error and improving system response.

As the GA progresses through generations, it utilizes a mechanism akin to natural selection. Solutions that exhibit promising traits, i.e., coefficients that are closer to the desired objective, are marked as genes and carried forward to subsequent generations. This selective process helps refine the coefficients towards optimal values. Conversely, solutions with less favorable traits are discarded, ensuring that the algorithm avoids getting stuck at local optima.

Furthermore, the GA introduces diversity into the population by creating new individuals independently of the previous generations. This diversity is essential to explore the search space comprehensively, preventing premature convergence to suboptimal solutions. The combination of selective retention of promising coefficients and the introduction of novel solutions allows the GA to iteratively refine the PID controller's parameters, ultimately leading to the observed improvements in controller performance.

In summary, the Genetic Algorithm played a crucial role in the fine-tuning of the filter and adaptation coefficients, contributing significantly to the enhanced robustness and performance of the PID controller in the context of changing and dynamic conditions. In light of these details, an explanatory Genetic Algorithm flowchart is drawn in Figure 6.

In this study, the lower limit of the Filter coefficient  $\tau$  was determined as 0 and the upper limit was determined as 4, the lower limit of the adaptation coefficient  $\alpha$  was 0 and the upper limit was 2, the population number was 100, and the mutation rate was 20%. The optimal value of the  $\tau$  parameter was

determined as 0.149 for the current system through the utilization of a genetic algorithm.

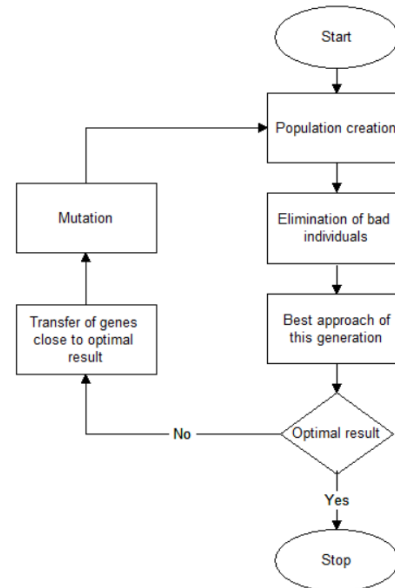


Figure 6. The flowchart of Genetic Algorithm

3. Results

According to the information presented, Table 3 displays the values of objective functions corresponding to the ISO road input, whereas Table 4 shows the same values for the step input, and Table 5 displays the values for the bump input.

Table 3.  $G_1$  and  $G_2$  results according to ISO road input

	$G_1$	$G_2$
Passive	67.26	56.47
PID	33.73	64.21
Filter PID	30.43	53.72

Table 4.  $G_1$  and  $G_2$  results according to step entry

	$G_1$	$G_2$
Passive	2.731	4.317
PID	1.564	4.855
Filter PID	0.974	4.063

Table 5.  $G_1$  and  $G_2$  results according to bump entry

	$G_1$	$G_2$
Passive	3.456	1.989
PID	2.548	3.041
Filter PID	1.248	1.332

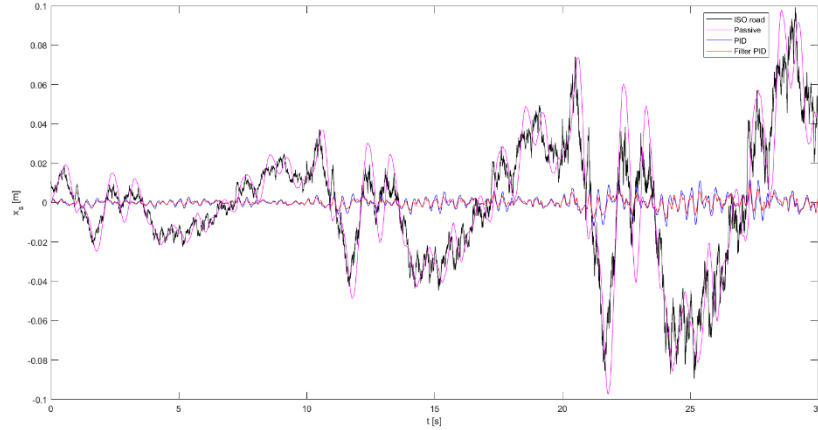
Upon analysis of the results obtained from the evaluation of the goal functions, it was observed that the Filter PID method exhibited superior performance compared to both the Passive and PID-only approaches. This particular method displayed enhanced responsiveness and dynamic behavior in the presence

of abrupt load changes, such as Step and Bump inputs. Additionally, it demonstrated high effectiveness in tasks involving ISO road input.

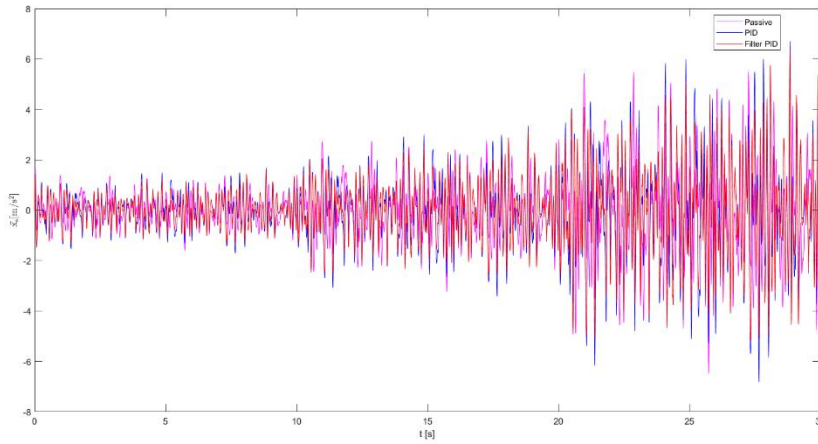
Figure 7 presents the  $x_s$  graph pertaining to the ISO path input, while Figure 8 illustrates the acceleration of  $x_s$  for each case. In contrast, Figures 9 and 10 depict the graphs for the step input,

and Figures 11 and 12 display the behavior corresponding to the bump entry.

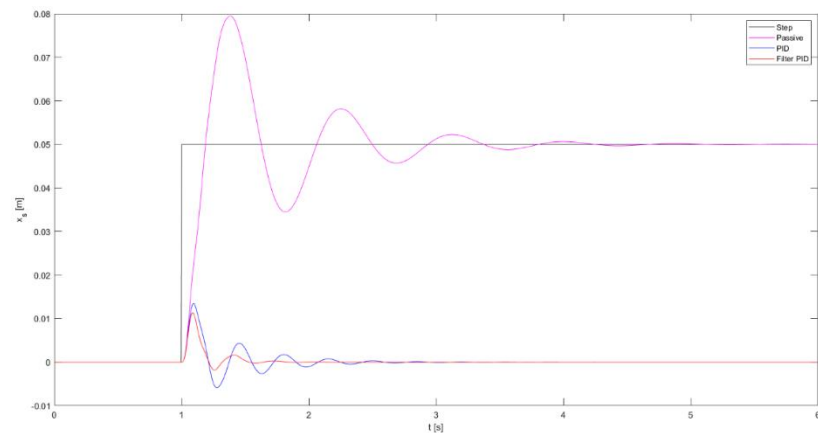
The effectiveness of the Filter PID method is more clearly evident in the position graphs of the spring-mass system as compared to the passive and only PID cases.



**Figure 7.** The position-time graph of all systems according to ISO path entry



**Figure 8.** The acceleration-time graph of all systems according to ISO path entry



**Figure 9.** The position-time graph of all systems according to step entry

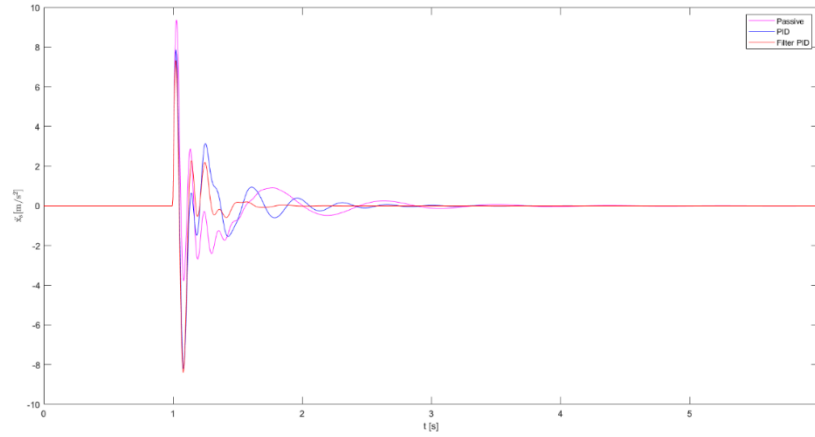


Figure 10. The acceleration-time graph of all systems according to step entry

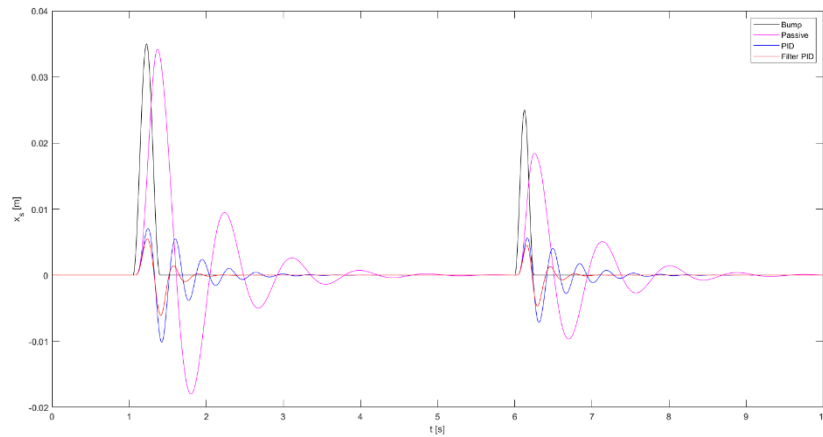


Figure 11. The position-time graph of all systems according to bump entry

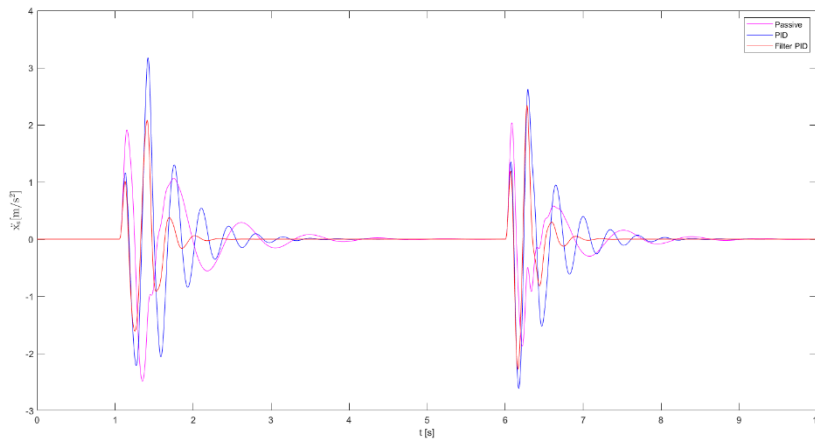


Figure 12. The position-time graph of all systems according to bump entry

To explain the relatively lesser control over acceleration values compared to position values, it's essential to consider that the optimizations were conducted with a goal function correction value set at 50. Reducing this value would render the coefficients more inclined towards enhancing acceleration. While Table 6 may not demonstrate substantial improvements for ISO input values, Tables 7 and 8 reveal a more significant enhancement, particularly for systems characterized by larger disparities between position and acceleration.

Table 6.  $ISE_a$  and  $IAE_a$  results according to ISO path entry

	$IAE_a$	$ISE_a$
Passive	28.84	56.18
PID	30.65	64.20
Filter PID	28.25	53.71

**Table 7.**  $ISE_a$  and  $IAE_a$  results according to step entry

	$IAE_a$	$ISE_a$
Passive	1.61	4.29
PID	1.39	4.85
Filter PID	0.90	4.06

**Table 8.**  $ISE_a$  and  $IAE_a$  results according to bump entry

	$IAE_a$	$ISE_a$
Passive	1.95	1.97
PID	2.21	3.05
Filter PID	1.10	1.34

In order to evaluate the robustness of the system, 10% increments are introduced to the mass of the spring-mass setup. The results obtained from these tests are presented in Table 9, Table 10, and Figure 13. Upon analysis of Table 9, it is observed that the Filter PID method maintains consistent performance even with an increase in mass, whereas the PID-only approach displays decreased performance as it is highly susceptible to changes in parameters. The passive system also experiences a reduction in performance but to a lesser extent than the PID-only method. Similarly, Table 10 reveals that although an increase in mass results in an improvement in acceleration, the Filter PID method continues to exhibit the highest performance.

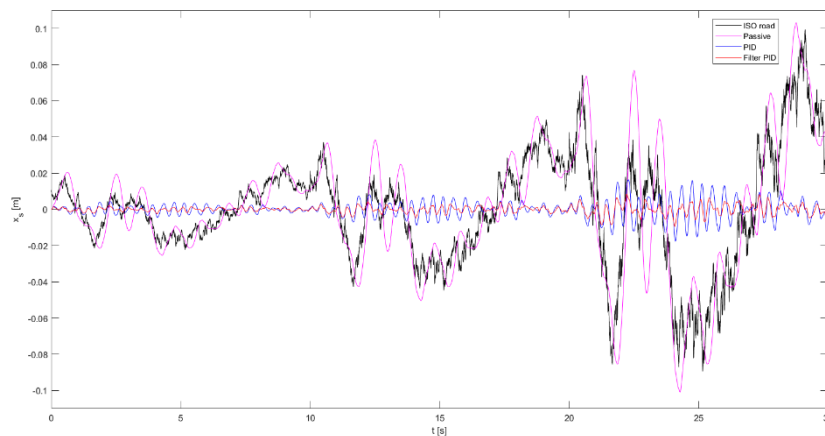
**Table 9.**  $IAE_p$  results according to ISO path entry for mass change

Mass (kg)	Passive	PID	Filter PID
290	0.7685	0.0617	0.0436
319	0.7821	0.0649	0.0438
348	0.7930	0.0695	0.0443
377	0.8005	0.0761	0.0449
406	0.8047	0.0851	0.0456
435	0.8059	0.0995	0.0469

**Table 10.**  $IAE_a$  results according to ISO path entry for mass change

Mass (kg)	Passive	PID	Filter PID
290	28.81	30.65	28.25
319	26.72	28.68	25.84
348	24.97	27.45	23.90
377	23.45	26.94	22.30
406	22.18	26.75	20.99
435	21.03	27.65	19.91

Furthermore, Figure 13 depicts the position graph for the case with a 50% mass increase, where it is evident that the Filter PID method is unaffected by changes in mass. These results demonstrate that the Filter PID method provides superior robustness to the PID controller and effectively addresses one of its major shortcomings, which is its dependence on system parameters.



**Figure 13.** The position-time graph for 50% mass increase according to ISO path entry

**Table 11.**  $G_1$  results according to ISO path entry for damping coefficient change

$c_s$ (Ns/m)	Passive	PID	Filter PID
1000	67.26	33.73	30.43
900	67.25	32.27	28.97
800	67.48	30.80	27.50
700	68.04	29.34	26.02
600	69.06	27.91	24.54
500	70.85	26.56	23.07

**Table 12.**  $G_1$  results according to ISO path entry for spring coefficient change

$k_s$ (N/m)	Passive	PID	Filter PID
16812	67.26	33.73	30.43
15131	66.64	33.18	30.14
13450	65.83	32.68	29.90
11768	64.88	32.25	29.71
10087	63.86	31.88	29.58
8406	62.92	31.59	29.50

In order to further broaden the scope of the study, comparisons have not been limited solely to mass; the spring coefficient  $k_s$  and damping coefficient  $c_s$  have also been subjected to a 10% variation. Despite these changes, Filtered PID has managed to maintain its robustness. As can be seen in Tables 11, 12, 13 and 14, Filtered PID values are far from sudden changes.

#### 4. Discussion and Conclusion

The current study utilized a quarter car model and employed a PID controller incorporating a low-pass filter to control the active suspension system. The Ziegler-Nichols method was employed to determine the coefficients of the PID controller, and Genetic Algorithm was utilized to optimize the filter and adaptation components. The results obtained from this study suggest that the incorporation of the filter and adaptation parts significantly improves the performance of the PID controller.

The linear structure of the PID controller results in poor performance when faced with changes in system parameters. Consequently, these controllers often fail to meet the essential evaluation criterion of robustness, which is a crucial characteristic for effective controllers. Nevertheless, the present study demonstrates that the integration of a filter with PID controllers can enhance their robustness. Consequently, this newly designed controller can be readily implemented in systems with variable parameters, thereby addressing the issue of poor performance associated with changes in system parameters.

#### Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need for an ethics committee approval in the current article.

There is no conflict of interest with any person/institution in the current article.

#### Author Contribution Statement

İbrahim Şenaslan: Conceptualization, investigation, methodology and software, visualization and writing – original draft.

Boğaç Bilgiç: Conceptualization, investigation, methodology and software, supervision and writing – review and editing.

#### References

- [1] Yu, B., Wang, Z., Wang, Z., et al. 2019. Investigation of the Suspension Design and Ride Comfort of an Electric Mini Off-road Vehicle, *Advances in Mechanical Engineering*, 11(1):1-10. DOI: 10.1177/1687814018823351.
- [2] Silva, R.R.M.R., Reinaldo, I.L., Montenegro, D.P., et al. 2021. Optimization of Vehicle Suspension Parameters based on Ride Comfort and Stability Requirements, *Journal of Automobile Engineering*, 235(7):1920-1929. DOI: 10.1177/0954407020983057.
- [3] Sert, E. 2017. Improvement of the Vehicle Stability Using Suspension Optimization Methods, *International Journal of Automotive Engineering Technologies*, 6(2):70-84.
- [4] Jazar, R.N. *Vehicle Dynamics: Theory and Applications*. Springer. 455.
- [5] Guglielmino, E., Sireteanu, T., Stammers C.W., et al. 2008. *Semi-active Suspension Control, Improved Vehicle Ride and Road Friendliness*. Springer-Verlag London Ltd. 302s. DOI: 10.1007/978-1-84800-231-9
- [6] Nagarkar, M., Bhalerao, Y., Bhaskar, D., et al. 2022. Design of Passive Suspension System to Mimic Fuzzy Logic Control Active Suspension System, *Springer*, 11:109. DOI: 10.1186/s43088-022-00291-3.
- [7] Yerrawar, R.N., Arakerimath, R.R. 2017. Development of Methodology for Semi Active Suspension System Using MR Damper, *Elsevier*, 4(8):9294-9303. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.07.289.
- [8] Hyniova, K. 2022. Disturbance Rejection in a One-half Vehicle Suspension Using a Fuzzy Controller, *International Scientific Journal*, 7(3):98-102.
- [9] Soliman, AMA., Kaldas, MMS. 2019. Semi-active suspension systems from research to mass-market –A review, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 40(2):1005-1023. DOI: 10.1177/1461348419876392.
- [10] Jayachandran, R., Krishnapillai, S. 2013. Modeling and optimization of passive and semi-active suspension systems for passenger cars to improve ride comfort and isolate engine vibration, *Journal of Vibration and Control*, 19(10):1471-1479. DOI: 10.1177/1077546312445199.
- [11] Ang, K.H., Chong, G. 2005. PID Control System Analysis, Design and Technology, *IEEE Transactions on Control System Technology*, 13(4):559-576. DOI: 10.1109/TCST.2005.847331.
- [12] Ergin, A., Sandal, B., 2023. Mobbing among seafarers: Scale development and application of an interval type-2 fuzzy logic system, *Ocean Engineering*, 286:115595. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115595.
- [13] Gad, G.A. 2022. Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications: A Systematic Review, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29:2531-2561. DOI: 10.1007/s11831-021-09694-4.
- [14] Huba, M., Chamraz, S., Bistak, P., et al. 2021. Making the PI and PID Controller Tuning Inspired by Ziegler and Nichols Precise and Reliable, *Sensors*, 21(18): 6157. DOI: 10.3390/s21186157.
- [15] Hemati, A., Shooshtari, A. 2019. Suspension damping optimization using genetic algorithms, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 8(4): 178-185.
- [16] Çakır, M.F., Bayraktar, M. 2020. Modelling of Main Battle Tank and Designing LQR Controller to Decrease Weapon Oscillations, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(4):1861-1876. DOI: 10.17341/gazimfd.660584.
- [17] Ümütlü, R.C., Öztürk, H., Bıdıklı, B. 2022. An Adaptive Controller Design for ATMD System Used in Structures Under the Effect of Unknown Nonlinear Effects, *DEUFMD*, 24(71): 571-579.
- [18] Jiregna, I., Sirata, G. 2020. A review of the vehicle suspension system, *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 4(2): 109-114. DOI: 10.30464/jmee.2020.4.2.109.
- [19] Theunissen, J., Tota, A., Gruber, P., et al. 2021. Preview-based techniques for vehicle suspension control: a state-of-the-art review, *Annual Reviews in Control*, 51: 1367-5788. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2021.03.010.
- [20] Palanisamy, S., Karuppan, S. 2016. Fuzzy Control of Active Suspensiyon System, *Journal of Vibroengineering*, 18(5): 3197-3204. DOI: 10.21595/jve.2016.16699.
- [21] International Standard. 2016. *Mechanical vibration — Road surface profiles — Reporting of measured data*. (ISO standard no. 8608:2016.)
- [22] Loprencipe, G., Zoccali, P. 2017. Use of Generated Artificial Road Profiles in Road Roughness Evaluation, *J. Mod. Transport*, 25(1): 24-33. DOI: 10.1007/s40534-017-0122-1.
- [23] Utkin, V., Guldner, J., Shi, J., 2009. *Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems*. 2nd. Boca Raton, London: CRC Press, Taylor & Francis, 503s. DOI: 10.1201/9781420065619.
- [24] Zorlu, H., Sunca, Ş. 2017. Genetik Algoritma Kullanılarak Ağırlıklandırılmış Myriad Filtrelerin Optimizasyonu, *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 1(1): 9-14.
- [25] Taşpınar, T., Orman, Z. 2023. Genetik Algoritmalar ile Deniz Taşımacılığında Hız Optimizasyonu, *İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi*, 3(2): 82-97.





RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALASI

## Fatigue Properties of Zinc Coated Low Carbon Steel Sheet Joints by the Means of Spot Welding

### Çinko Kaplı Düşük Karbonlu Çeliklerin Nokta Kaynak Bağlantılarının Yorulma Özellikleri

Ahmet Çetkin \*<sup>ID</sup>

Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makina Mühendisliği Bl., Afyonkarahisar, TÜRKİYE

Corresponding Author / Sorumlu Yazar\*: acetkin@aku.edu.tr

#### Abstract

EN 10346:2015 DX52D+Z steel is a low-carbon, zinc-coated steel suitable for cold forming, widely used in the automotive industry due to its superior formability despite its low strength. Sheets produced in different sizes and forms are annealed by passing through the continuous galvanizing line after cold rolling. In this study, fatigue properties of these steels which were joined by spot welding with low welding current and high welding cycles, were measured and failure characterization was made, too. Tensile testing was made using a number of lap joints with different parameters and the variation of hardness within the weld area was also investigated. During the fatigue testing, crack initiation and propagation have been experimentally determined. A significant increase in hardness was observed from the base metal to the weld nugget, and the welding process caused a 38% reduction in the strength of the base material due to the heat affect from the joint. In the microhardness test, the highest hardness value was measured in the weld nugget heat affected zone (228.4 HV), and the hardness of the base metal was 169.4 HV. It has been determined that welded joints have infinite life below approximately 20% of the maximum tensile load.

**Keywords:** Low carbon steel, Spot welding, Low welding current, High welding cycles, Fatigue limit

#### Öz

EN 10346:2015 DX52D+Z, düşük mukavemetine rağmen üstün şekillendirilebilirliği nedeniyle otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan, düşük karbonlu, soğuk şekillendirmeye uygun çinko kaplı bir çeliktir. Farklı ebat ve formlarda üretilen saclar, soğuk haddeleme sonrası sürekli galvanizleme hattından geçirilerek tavlanaştırılmaktadır. Bu çalışmada düşük kaynak akımı ve yüksek kaynak çevrimi ile nokta kaynağı ile birleştirilen bu çeliklerin yorulma özellikleri ölçülerek hasar karakterizasyonları da yapılmıştır. Farklı parametrelere sahip bir dizi bindirmeli bağlantı kullanılarak çekme testi yapılmış ve kaynak bölgesindeki sertlik değişimi de incelenmiştir. Yorulma testi sırasında çatlak başlangıcı ve ilerlemesi deneysel olarak belirlenmiştir. Ana metalden kaynak çekirdeğine kadar sertlikte önemli bir artış gözlenmiş ve kaynak işlemi, birleştirmeden gelen ısı etkisinden dolayı ana malzemenin mukavemetinde %38'lik bir azalmaya neden olmuştur. Mikrosertlik testinde en yüksek sertlik değeri kaynak çekirdeğinin ısıdan etkilenen bölgesinde (228.4 HV) ölçülmüştür ve ana metalin sertliği 169.4 HV olmuştur. Kaynaklı bağlantıların maksimum çekme yükünün yaklaşık %20'sinin altında sonsuz ömre sahip olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Düşük karbonlu çelik, Nokta kaynağı, Düşük kaynak akımı, Yüksek kaynak döngüleri, Yorulma limiti

#### 1. Introduction

Spot welding is the most important joining technique in the production of basic parts of the vehicles, such as the chassis, it is mostly associated with automotive manufacturing. In addition to the developments on the spot welding method, other joining methods are also in the process of making continuous progress in the manufacture of the body and bodywork, such as laser spot welding [1]. It is mostly significant in the automotive and white goods sectors that studies on safety of passengers and the weight reduction on the vehicle have led to the use of different materials together and ultimately search for a different manufacturing method. However, the most important joining method in the manufacture of vehicles is still the electric resistance spot welding method. Compared to other methods in production of vehicles, the rate of use of spot welds in the vehicle body is

around 85% and an average of 3,000 to 5,000 spot welds are made on the bodywork of the vehicles [2].

Many studies on issues such as eliminating the basic problems encountered during the application of spot welding, obtaining more effective results with changes in parameters, new applications in spot welding techniques, etc. have continued to advance from the first days until today [3-11]. Spot welding problems such as welding spatters, the degradation of the electrode tip causing short electrode life, a decrease in strength due to misalignment, shunt current loss between welded points, welding of more than two sheets, spot welding of different metals such as aluminum and steel sheets, surface coatings, surface oxides and surface contact resistance etc. problems have been extensively studied [12- 20].

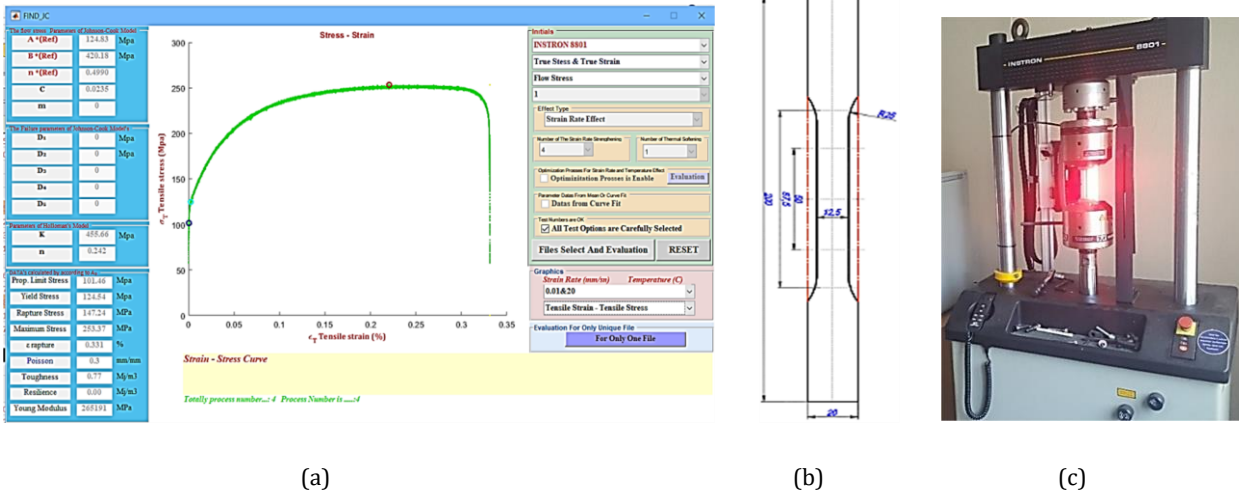


Figure 1. a) Software interface, b) Tensile test specifications and c) Quasi-static tensile test machine

Table 1. Mechanical properties of EN 10346:2015 DX52D+Z steel

Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength(Mpa)	Total Elongation (%)	Holloman Plasticity Model Coefficient		Johnson-Cook Plasticity Model Coefficient		
			K	n	A	B	n
124,54	253,37	33,1	455,66	0,242	124,83	420,18	0,499

Table 2. Chemical composition of EN 10346:2015 DX52D+Z steel

	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	Nb%	
	0.050	<0.001	0.249	0.006	0.028	0.034	0.014	<0.002	
	Al%	Cu%	Co%	B%	Ti%	V%	W%	Sn%	Ca%
	0.165	0.030	0.014	0.0074	0.001	0.003	0.006	0.006	0.0027
	As%	Mg%	Ce%	La%	Pb%	Sb%	Te%	Zr%	Fe%
	0.013	0.0006	0.021	0.012	0.003	<0.005	<0.001	<0.001	99.291

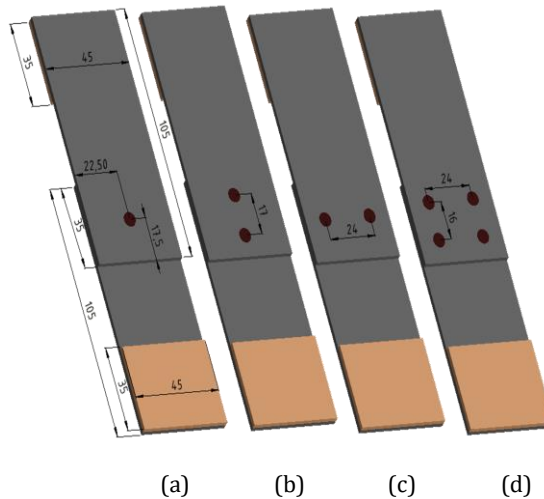


Figure 2. Typical geometry of tensile shear spot welding samples including multi-points, a-Single point welded(OP), b-Welded from two vertical points(TVP), c-Welded from two horizontal points(THP), d-Four point welded(FP).

Many studies have also been conducted on the fatigue behaviour of different types of loading effects to evaluate the fatigue strength of spot weld joints [21-23]. Many different methods have also been proposed to estimate fatigue life of the spot-welded joints [24-26]. Using fracture mechanics approach that

considers a nugget edge as a crack tip, the fatigue life of the joints was evaluated on the local stress around weld nugget and local strain in the vicinity of a weld nugget [27-32].

The aim of this study is to experimentally investigate the fatigue properties of plates joined to each other by spot welding of EN 10346:2015 DX52D+Z steel, which is preferred for its easy formability in the automotive industry. First of all, by keeping the other five important parameters (Electrode diameter, welding time, squeeze time, holding time and electrode force) constant, the welding current that creates the maximum tensile force was determined. The lap joints were produced with a single and multiple spot welds and tensile tested. The structure and size of the weld nugget, fatigue crack initiation and propagation were examined and fracture mechanisms related to the failure have been discussed.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Materials and methods subheading

The basic mechanical properties and chemical composition of EN 10346:2015 DX52D+Z steel are shown in Table 1 and Table 2, respectively. The tensile test samples (Fig. 1b) prepared according to EN ISO 6892-1 standards were tensile tested with the 8081-Instron universal servo-hydraulic testing machine (Fig. 1c) at a crosshead speed of 0.01 mm/s at room temperature in accordance with the standards. Here, the data from ten samples were calculated using software and the basic tensile test average data were obtained (Fig. 1a).

A semi-automatic spot welder (SIMSEK 50KA) was used for the welding process. Two sheets of 1 mm thickness were joined under pre-set PLC control parameters. For this sheet metal thickness, the recommended G-16 type copper alloy electrode caps were used for all spot welds. The diameter of the caps is 16mm and the diameter of the welding contact surface is 6mm. The overall dimensions of samples for fatigue tests are shown in Figure 2. The sheets were prepared and tested according to EN ISO 14273 (Specimen dimensions and procedure for shear testing of resistance spot welds); the samples were in dimensions of 45 x 105 mm and sliced parallel to rolling direction, and welded according to the dimensions determined by the standard. In specimens of shear type tensile fatigue test, two spacers of 45 mm length of the same thickness were mounted on the sample ends in order to reduce the bending effect. The two sheets to be

welded were mounted together with 35 mm long surfaces. As it can be seen in Figure 2, that a combination of a single, double and quadruple spot welds were used in the tests; spacing between the spot welds and edges were determined with sufficient distance.

### 2.2. Optimal weld current procedure

Studies showed that the most important parameter for the optimum quality, strength and fatigue life of the weld joint is the form of the nugget that forms between the sheet metals during the spot welding process. [23, 33-35]. There are many spot welding parameters such as electrode diameter, current holding time, clamping time, electrode force, welding current etc. for the formation of the spot weld joint. The latter is the most significant parameter compared to other process parameters that determine the quality of the weld joint. If the welding current is too low, it is impossible to have sufficient heat generated to form the weld nugget and hence low mechanical properties are inevitable. Even if a nugget is formed, it may cause a low strength because of spot weld nugget considerably smaller than the minimum nugget diameter [36, 37]. When the current is high, there is a risk of over melting the entire weld nugget region and result in a decreased thickness of nugget zone.

The basic principle in spot welding nugget formation is the contact resistance at the electrode-sheet and the sheet-sheet interfaces, playing a dominant role in the Joule heat generation encountered by the welding current as it passes from one electrode to the other. Hence, the heat is produced in proportion to the contact resistance of the region formed by the electrodes and plates [38], and the temperature increase in this region causes an increase in the overall resistance of this region. Melting in this zone firstly begins at the contact surface between the sheets and spreads into the other parts of the both sheets, leaving metallurgically affected base metal nearby nugget zone.

Electrode surface contact diameter was selected as a 6 mm and 30 cycles of weld time, 60 cycles of squeeze time, 30 cycles of holding time, 260 kP of electrode force. By keeping these parameters constant, an optimum the strength levels of the joints were attempted to obtain with the changing welding current. Tensile test of specimen joined with different welding currents

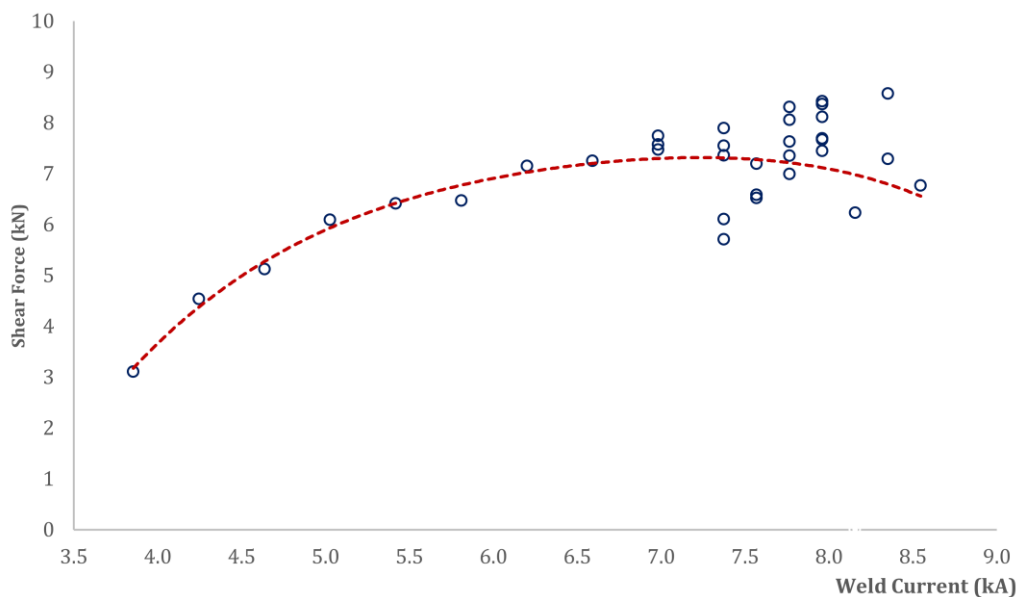


Figure 3. Shear load vs. weld current plot for optimal welding parameters choice

and consequent microscopic examination showed that 7.75 kA gives the best optimal shear force value for samples spot welded (Fig. 3).

The tensile shear test graph of three samples with different numbers of spot-welding combination produced by using 7.75 kA welding current is given in Figure 4; other parameters were kept constant. In order to determine the force for fatigue test, which is to be performed later, the shear force values were used by taking the average of 20 shear force-extension tests for each test.

When the stiffness exceeds the selected 25% value, the joint is now considered to be failed [39]. The testing was carried out and the results were calculated over the entire test values as in Figure 4 for a single weld point and for 33%-50%-66% of the average maximum shear force. As seen in Figure 5, it was determined that the stiffness value appeared from the upper value of 47% and slowly progressed downwards throughout the entire test. A large decrease was observed suddenly when the fatigue life reached 90-95% due to the growing fatigue cracks being unable to carry the load.

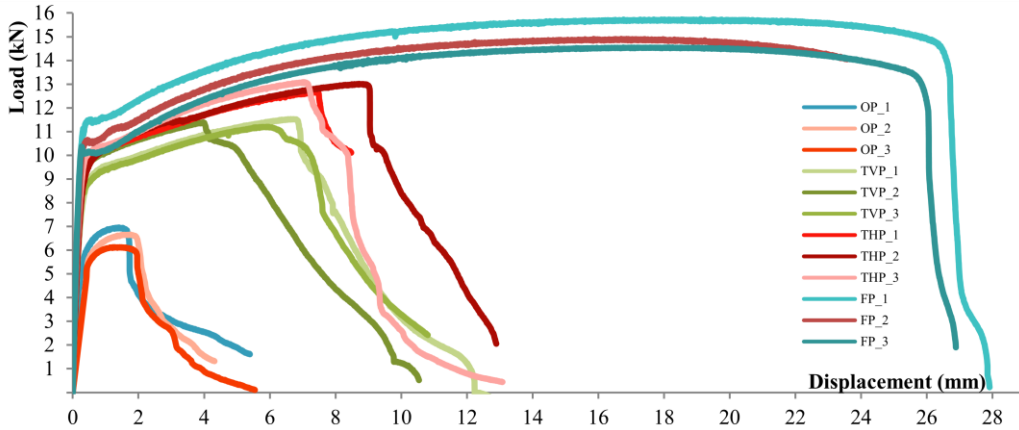


Figure 4. Shear load vs. weld current plot for optimal welding parameters choice

2.3. Fatigue test procedure

8801-Instron universal servo-hydraulic testing machine was used to conduct fatigue test on lap joint and non-welded test specimens. The spot-welded samples were subject to various sinusoidal load by using SAX software preloaded on the universal testing machine. Considering the sensitivity of the test device,  $R = 0.1$  for load ratio and a test loading frequency of 25 Hz were used. In similar studies, the loading frequency was taken within the range of 5-25 Hz [39, 40]. The weld stiffness behaviour during fatigue loading test is observed in the force data obtained from load cell and the displacement data measured with an extensometer. For welded samples, the weld stiffness value is taken as 25% as given in the literature [39]. The stiffness value is the ratio of the differential force value to the displacement change during the test, and the results were evaluated after the tests.

2.4. Microstructure, fracture morphology observation and microhardness measurements

For microstructure and fracture morphology observation, all welded samples were longitudinally sliced along the center of the nugget. The cutting process was done manually on a Metkon Metacut-M250 precision cutting machine at high speed.

The sample was mounted for polishing using a thermosetting plastic compound. The cross-section of the samples was polished using sand-paper to 1 micron and then etched by holding it in 3% Nital etchant fluid for 3-3.5 seconds.

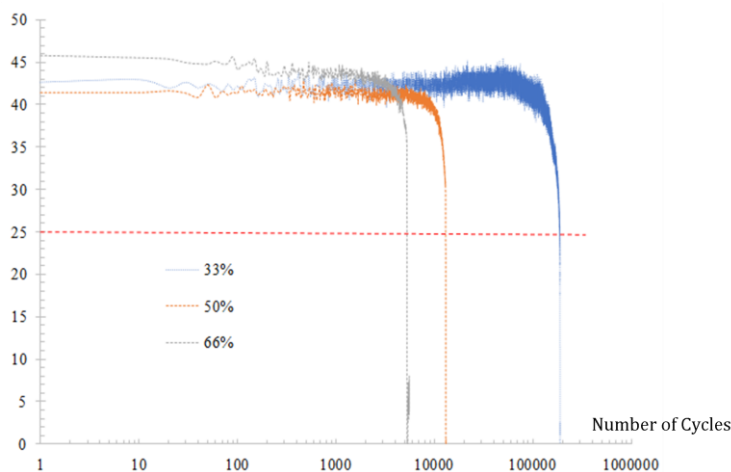
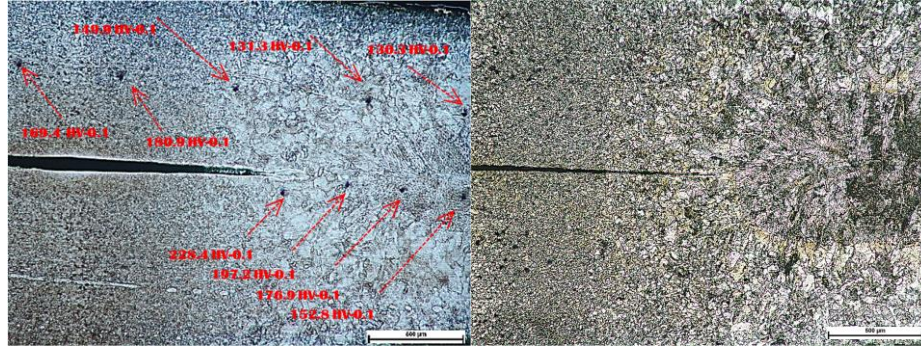


Figure 5. Stiffness ratio vs. number of cycles graphs for three fatigue load ratios





(a)



(b)

(c)

**Figure 6.** (a) Macrostructure of weld nugget and zones (Base Metal (BM), Heat Affected Zone (HAZ), Fusion Zone (FZ)) (b) Microhardness of weld nugget region, (c) Microstructure of weld nugget.

Vickers hardness tests were performed with a 100 g load using Mikrobul low load Vicker hardness tester, on the surface of the polished specimens. In addition, the measurement was made along a line parallel to the sheet contact area and at a distance of 850  $\mu\text{m}$  in order to make measurements in the base metal area with localized microstructural changes took place in the weld area in Figure 6; hardness values, microhardness indentations and the distances between them is also given in Figure 6.

Half and symmetrical weld nugget is shown in Figure 6a. The hardness values measured here are also symmetrical with other side of the welding. The three typical microstructures in the welded joint region are called base metal (BM), fusion zone (FZ) and heat affected zone (HAZ) [Fig. 6a]. The heat affected zone (HAZ) and the base metal (BM) are clearly separated and this separation is clearly determined by the microhardness test. In Figure 6a, it can be seen that a hardness of approximately 152.8 HV-0.1 in the weld nugget and 169.4 HV-0.1 in the base metal were measured, and hardness reaching the highest value in the near region of the line separating the weld nugget and the base metal with 228.4 HV-0.1.

The ferritic-martensitic structure seen in the welding nugget of low carbon steels and the heterogeneous appearance in the HAZ, which is also confirmed by hardness measurement, are given in Figure 6b. In some studies, it has been determined that the formation of martensite in the welding area of this type of steel is due to the quenching effect of copper alloy electrodes and their quenching effect, as well as the short welding cycle. In these FE technique studies [41-44] in which the weld joint was modeled, it was calculated that even the 1000  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  cooling rate required for martensite formation was exceeded. As seen in Fig 6c, as in similar studies, the HAZ structure in the region close to the fusion boundary consists of martensite, grain boundary ferrite and Widmanstatten ferrite [45].

### 3. Results

The fatigue life curves of EN 10346:2015 DX52D+Z steel are shown in Figure 7. Infinite life values for the spot-welded joints (Fig. 7) are taken according to the maximum shear force (Figure 4). The % ratio of test results is given in Figure 8. The forces were divided into ten equal parts and applied on the samples prepared in accordance with the standard. It was assumed that it would reach an infinite lifetime when the number of cycles exceeded  $1\text{E}+7$ .

Each data sets having different type or number weld point could be characterized by similar smooth curves as in Fig. 7 and Fig. 8. For test specimens with four different number of spot weld joints, changes were observed according to the nature of the force magnitude and the life limits were found to be similar based on the load amplitude ratio %. As a result of the tests, it was observed that the fatigue strength was approximately 20% of the static joint strength. The static strength values used here were obtained by averaging more than twenty quasi-static tensile shear tests (Test speed=0.01 mm/s) for each sample containing a different number of spot welds. The life curves found by the least squares' method, which can be defined by the exponential equation, can be defined by the number of load cycles applied to the sample up to the values above the life limit (Fig. 7). In the equations obtained from the curve fitting, the average R-square of the curve-fit procedure was calculated as 98.2%

Fatigue cracks are encountered in a circular geometry in the sample around the weld at the sheet interface. This circular form is one of the most obvious indicators of stress concentration. Throughout the entire fatigue life, it is believed that the crack path was determined by the stress distribution around the weld as no preferred microstructural path was found [39]. Fatigue strength depends on the nature of the load on the spot weld and the stress concentration factor of the circumferential notch around the weld [21].



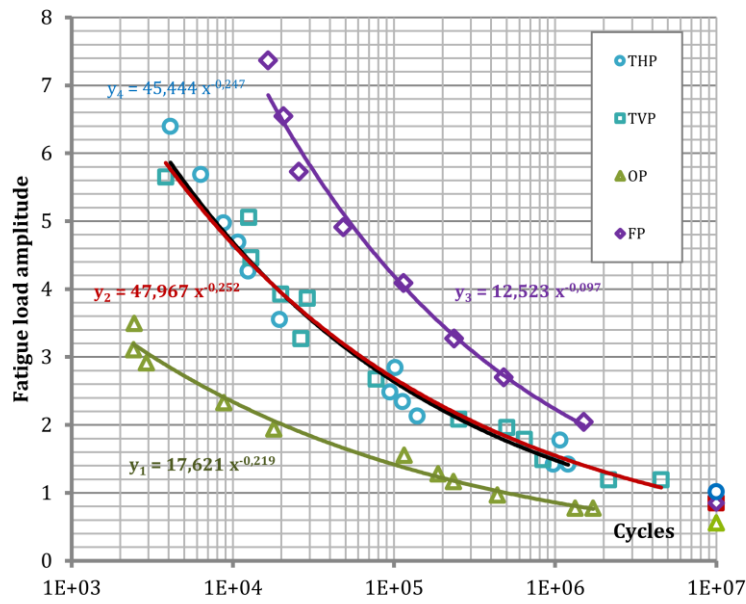


Figure 7. Fatigue load amplitude vs. cycles-to-failure curves for the tensile-shear samples

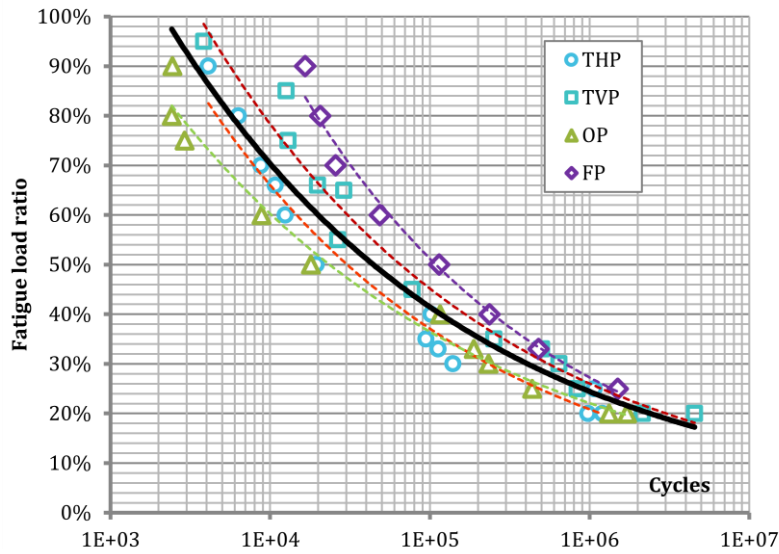


Figure 8. Fatigue load ratio vs. cycles-to-failure curves for the tensile-shear samples

Different types of failure modes can be associated with different separation load type and direction. Naturally, a similar type of failure mode was encountered in the tests. The samples exhibited a fracture morphology where the weld button remained intact on one sheet and separated from the other steel sheet. Fatigue crack was measured to occur at a distance of approximately 0.75 mm

from the weld button. When a fatigue crack is first formed, the crack propagates partially along the thickness of the sheet and around the circumference of the weld button at a small angle. Then crack continues to expand perpendicular to the direction of pull as it propagates planarly along the plane towards the base sheet (Fig. 9).

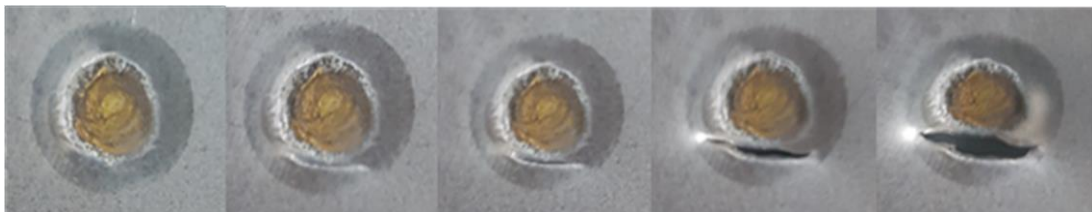
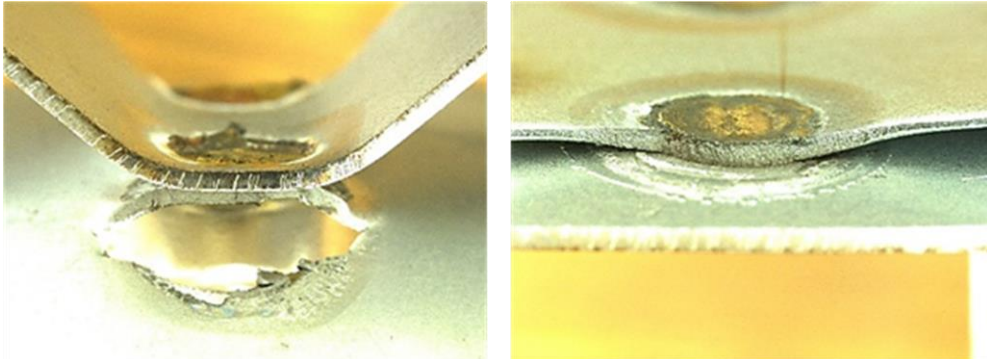


Figure 9. Development of crack propagation in %50 load amplitude ratio



**Figure 10.** (a) Failure mode on one-spot welded joint; (b) Failure mode on four-spot welded joint

At this moment, the crack completely penetrates the thickness of the sheet. Now that the crack has fully penetrated the sheet thickness, the weld is further released and the tensile-shear specimen tends to rotate due to the unbalanced load distribution of the load. As a result, the specimen rotates slowly about an axis parallel to the tensile plane of the tester jaws (Fig. 10a), except for the four spot welded specimen by its nature (Fig. 10b).

Fatigue increases the stress triaxiality at the crack tip, thus further increasing the crack growth rate. The overall failure occurs by tearing of the base material due to the fact that it can no longer carry the increasing load with the effect of an additional moment applied at the crack tip.

Microstructures and fatigue crack surface morphologies are shown in Fig.10 and Fig. 11. As seen in Figure 11., both striation-like characteristic structure and non-uniform dimple-like structures were observed. This image suggests a ductile type of failure. Coarse columnar dendritic crystals (Fig. 6), which can be easily observed in the spot weld nugget, are surrounded by the heat affected zone, which has a boundary with different microhardness values from the base metal and weld nugget. After the fatigue load, the stress concentration forms a crack. Crack path is determined along the HAZ boundary, crack initiation and propagation are probably due to the interaction between plastic zone formation in this circumferential notch.

#### 4. Discussion and Conclusion

An experimental investigation of the fatigue properties of EN 10346:2015 DX52D+Z steel spot welded samples led to the following conclusions:

1. Microhardness tests showed that a hardness of approximately 228.4 HV-0.1 in weld nugget boundary (HAZ), 169.4 HV-0.1 in base metal and 152.8 HV-0.1 in weld nugget.
2. The welding process caused a 38% decrease in the strength of the base material due to the joining by applied heat and its effect on the base metal, and it was observed that the fatigue strength was approximately 20% of the static strength.
3. Fatigue crack was measured to occur at a distance of approximately 0.75 mm from the weld button. When a fatigue crack is first formed, the crack propagates partially along the thickness of the sheet and around the circumference of the weld button at a small angle. Then crack continues to expand perpendicular to the direction of load as it propagates planarly along the plane towards the base sheet.

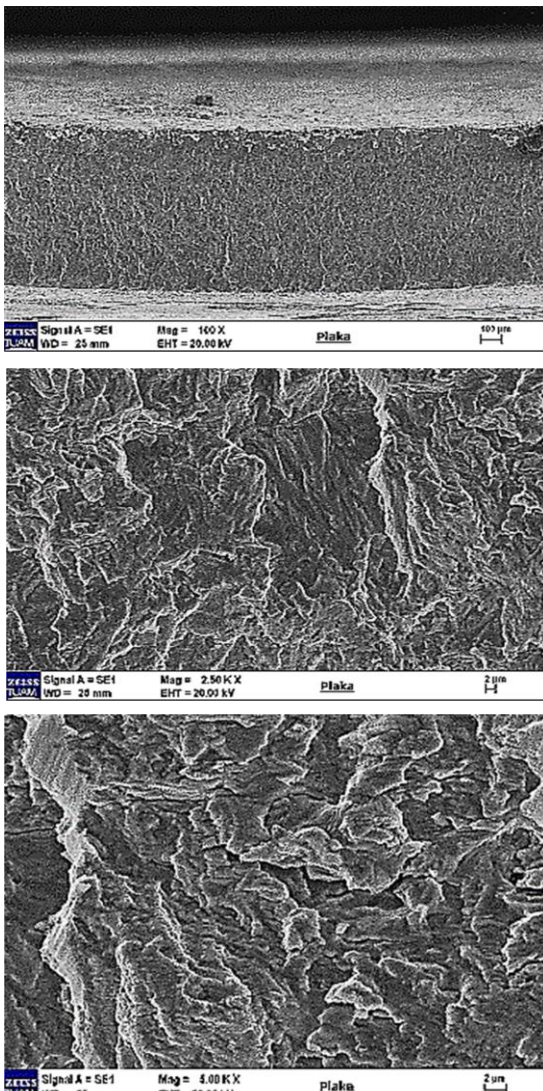
#### Ethics committee approval and conflict of interest statement

This article does not require ethics committee approval.

This article has no conflicts of interest with any individual or institution.

#### Acknowledgment

This work was supported by Afyon Kocatepe University, Scientific Research Projects Coordination Unit (18.FEN.BİL.65) Afyonkarahisar, Turkey.



**Figure 11.** Microstructure of the crack surface of the welded joint with a squeeze time of 60 cycles and a welding current of 5.4 kA

## References

- [1] Li, M., Tao, W., Zhang, J., Wang, Y., Yang, S. 2022. Hybrid resistance-laser spot welding of aluminium to steel dissimilar materials: Microstructure and mechanical properties, *Materials & Design*, Volume 221, 111022, ISSN 0264-1275.
- [2] Mallick, P.K. 2021. Chapter 8 - Joining for lightweight vehicles, In *Woodhead Publishing in Materials, Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles (Second Edition)*, Woodhead Publishing, Pages 321-371, ISBN 9780128187128, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818712-8.00008-2>.
- [3] Raut, M., Achwal, V. 2014, Optimization of Spot Welding Process Parameters for Maximum Tensile Strength, *Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res.*, 506-517.
- [4] Holdren, R.L. 1993. What Are the Causes of and Solutions to Weld Quality Control, *Welding Journal* Vol. 72, No. 8.
- [5] Hirsch, R.B. 1993. Tip Force Control Equals Spot Weld Quality, *Welding Journal*, vol. 72, No. 3.
- [6] Cullison, A. 1993. Resistance Weld Controller Delivers the Heat Where It's Needed, *Welding Journal*, Vol. 72, No. 6.
- [7] James, P.S. Chandler, H.W., Evans, J.T., Wen J, Browne, D.J., Newton, C.J. 1997. The Effect of Mechanical Loading on The Contact Resistance of Coated Aluminium, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 230, Issues 1-2, Pages 194-201.
- [8] Papkala, H. 1990. A New Method of Projection Welding of Galvanized Steel Sheet, *Welding International*, Volume 4, Issue 5 Pages 341-346.
- [9] Papkala, H. 1992, Technological Problems in Spot Welding of Galvanized Car Body Sheet, *Journal Welding International*, Volume 6, Issue 5.
- [10] Komizo, Y.I. 1987. Crack Susceptibility of Steel Plates Produced by The Thermo-Mechanical Control Process, *Welding International*, v.1, p.126-32.
- [11] Patel, S. Reddy, P., Kumar, A. 2021. A Methodology to Integrate Melt Pool Convection With Rapid Solidification And Undercooling Kinetics In Laser Spot Welding, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 164.
- [12] Graham, S.L., Holzer, R.A., Gerbic, J.F. 2007. System and Method for Reducing Weld Spatter, US 20070284350 A1.
- [13] Parshuramkar, N.T., Rambhad, K.S., Chandran, R. 2017. Welding Spatter Reduction and Time Study: A Review. *International Journal of Analytical, Experimental and Finite Element Analysis (IJAEFEA)*. 4. 10.26706/IJAEFEA.4.4.20171025.
- [14] Lum, I., Biro, E., Zhou, Y., Fukumoto, S., Boomer, D. 2004. Electrode Pitting in Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy 5182. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 35. 217-226. 10.1007/s11661-004-0122-8.
- [15] Ma, N., Murakawa, H. 2010. Numerical and experimental study on nugget formation in resistance spot welding for three pieces of high strength steel sheets. *Journal of Materials Processing Technology - J Mater Process Technol*. 210. 2045-2052. 10.1016/j.jmatprotec.2010.07.025.
- [16] Wang, B., Lou, M., Shen, Q., Li, Y., Zhang, H. 2013. Shunting effect in resistance spot welding steels - Part 1: Experimental study. 92. 182S-189S.
- [17] Müftüoğlu, F., Keskinel, T. 2007. Effect of Coating Thickness on Electrode Life in the Spot Welding of Galvanized Steels, *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 31, p.183 - 187.
- [18] Tomoyuki, F., Keiichiro, T., Yukinori, S., Takahiro, Y., Yoshinobu, S. 2016. Fatigue strength and fatigue fracture mechanism of three-sheet spot weld-bonded joints under tensile-shear loading, *International Journal of Fatigue*, Volume 87, Pages 424-434, ISSN 0142-1123, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.02.023>.
- [19] Chen, Z., Zhou, Y., Scotchmer, N. 2006. Coatings on Resistance Welding Electrodes to Extend Life. *SAE Transactions*, 115, 106-110, <http://www.jstor.org/stable/44722317>.
- [20] Zou, J., Zhao, Q., Chen, Z. 2009. Surface modified long-life electrode for resistance spot welding of Zn-coated steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 209, Issue 8, Pages 4141-4146, ISSN 0924-0136, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.10.005>.
- [21] Long, X., Khanna, Z.K. 2007. Fatigue properties and failure characterization of spot-welded high strength steel sheet *Int J Fatigue*, 29, pp. 879-886.
- [22] Wang, B., Duan, Q.Q., Yao, G., Pang, J.C., Li, X.W., Wang, L. 2014. Investigation on fatigue fracture behaviours of spot welded Q&P980 steel *Int J Fatigue*, 66, pp. 20-28.
- [23] Vural, M., Akkuş, A., Eryürek, B. 2006. Effect of welding nugget diameter on the fatigue strength of the resistance spot welded joints of different steel sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 176, Issues 1-3, Pages 127-132, ISSN 0924-0136, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.02.026>.
- [24] Pan, N., Sheppard, S. 2002. Spot welds fatigue life prediction with cyclic strain range, *Int J Fatigue*, 24, pp. 519-528.
- [25] Hassanifard, S., Zehsaz, M., Tohgo, K., Ohguma, T. 2009. The prediction of fatigue crack initiation life in spot welds *Strain*, 45, pp. 489-497.
- [26] Tanegashima, R., Akebono, H., Sugeta, A. 2017. Fatigue life estimation based on fracture mechanics of single spot-welded joints under different loading modes, *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 175, Pages 115-126, ISSN 0013-7944, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.01.031>
- [27] Nakayama, E., Miyahara, M., Okamura, K., Fujimoto, H., 2004. Fukui, K. Prediction of fatigue strength of spot-welded joints based on local material strength properties measured by small specimen, *J Soc Mater Sci, Jpn*, 53 (12), pp. 1136-1142.
- [28] Tohgo, K., Ohguma, T., Shimamura, Y., Ojima, Y. 2009. Influence of strength level of steels on fatigue strength and fracture morphology of spot-welded joints, *J. Soc. Mater. Sci, Jpn.*, 59 (7), pp. 627-634
- [29] Bae, D.H., Sohn, I.S., Hong, J.K. 2003. Assessing the effects of residual stresses on the fatigue strength of spot welds, *Weld. J.*, pp. 18s-23s.
- [30] Lin, S.H., Pan, J., Wung, P., Chiang, J. 2006. A fatigue crack growth model for spot welds under cyclic loading conditions, *Int J Fatigue*, 28 (7), pp. 792-803.
- [31] Ertas, A.H., Yilmaz, Y., Baykara, 2008, C. An investigation of the effect of the gap values between the overlap portions of the spot-welded pieces on fatigue life, *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, 222 (6), pp. 881-890.
- [32] Dancette, S., Fabregue, D., Estevez, R. 2012. A finite element model for the prediction of advanced high strength steel spot welds fracture, *Eng. Fract. Mech.*, 87, pp. 48-61.
- [33] Nguyen, T.N., Wahab, M.A. 1998. The effect of weld geometry and residual stresses on the fatigue of welded joints under combined loading, *J. Mater. Process. Technol.*, 77 (1-3), pp. 201-208.
- [34] Kumar, A., Panda, S., Ghosh, G.K., Patel, R.K. 2020. Numerical simulation of weld nugget in resistance spot welding process, *Materials Today: Proceedings*, Volume 27, Part 3, pp 2958-2963, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.901>.
- [35] Eisazadeh, H., Hamed, M., Halvae, A. 2010. New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using the finite element method, *Mater. Des.*, 31, pp. 149-157, 10.1016/j.matdes.2009.06.042
- [36] Ünlükal, E. 2007. Otomotiv Sanayinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak Kalitesinin Artırılması, Master Thesis, Bursa.
- [37] Akyol, M. 2001. Otomotiv Sanayinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak Uygulamaları ve Karşılaşılan Sorunlar, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Master Thesis, İstanbul.
- [38] Saleem, J., Majid, A., Bertilsson, K., Carlberg, T., Islam, N. 2012. Nugget Formation during Resistance Spot Welding using Finite Element Model, *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 67(7). 1228 - 1233.
- [39] Rathbun, R.W., Matlock, D., Speer, J.G. 2003. Fatigue Behavior of Spot Welded High-Strength Sheet Steels. *Welding Journal (Miami, Fla)*. 82. 207/S-218/S.
- [40] Guennec, B., Akira, U., Tatsuo, S., Masahiro, T., Yu, I. 2013. Effect of Loading Frequency in Fatigue Properties and Micro-Plasticity Behaviour of JIS S15C Low Carbon Steel, 13th International Conference on Fracture, 16-21 June, Beijing, China.
- [41] Mirzaei, F., Ghorbani, H., Kolahan, 2017. F. Numerical modeling and optimization of joint strength in resistance spot welding of galvanized steel sheets. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 92, 3489-3501.
- [42] Pouranvari, M., Abedi, A., Marashi, P., Goodarzi, M. 2008. Effect of expulsion on peak load and energy absorption of low carbon resistance spot welds. *Science and Technology of Welding & Joining*. 13. 39-43. 10.1179/174329307X249342.
- [43] Kocabekir, B., Kaçar, R., Gündüz, S., Hayat, F. 2008. An effect of heat input, weld atmosphere and weld cooling conditions on the resistance spot weldability of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 195. 327-335. 10.1016/j.jmatprotec.2007.05.026.
- [44] Shen, J., Zhang, Y., Wang, P.C. 2011. Nugget shifting in resistance spot welding of multi-stackup sheets. *Quarterly Journal Of The Japan Welding Society*. 29. 133s-137s. 10.2207/qjwjs.29.133s.
- [45] Khodabakhshi, F., Kazeminezhad, M., Kokabi, A. H. 2011. Mechanical properties and microstructure of resistance spot welded severely deformed low carbon steel. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing - Mater Sci Eng A-Struct Mater*. 529. 237-245. 10.1016/j.msea.2011.09.023.





## Hidrojen Üretimi ve CO<sub>2</sub> Yakalanmasını Aynı Cihazda Sağlayan Bir Membran Reaktörün Matematiksel Modelinin Geliştirilmesi

### Development of a Mathematical Model of a Membrane Reactor for Hydrogen Production and CO<sub>2</sub> Capture in Same Device

Yağmur Nalbant Atak 

Atılım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE  
Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: yagmur.atak@atilim.edu.tr

#### Öz

Sürdürülebilir bir gelecek için temel bir unsur olan hidrojen, küresel enerji ve çevresel zorluklarda önemli bir rol oynamaktadır. Hidrojen üretimi için öne çıkan yöntemlerden biri, yüksek verimlilik ve ölçeklenebilirlik sunan hidrokarbonlardan buhar metan reformasyonudur (BMR). Membran reaktörler (MR'ler), hidrojen üretimini ve ayrılmasını tek bir ünite içinde entegre ederek BMR sürecini geliştirmek için umut verici bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışma, bir MR içerisinde hem BMR ile hidrojen üretimini hem de membrandan geçemeyen gazlardan karbondioksit yakalanmasını içeren iki farklı prosesi içermektedir ve bu MR'nin 1-boyutlu matematiksel modeli oluşturulmuştur. İki önemli çalışma parametresinin (reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon basıncı) membran reaktör performansı üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenmiştir. Temel simülasyon koşullarında (773 K ve 3 bar), metan dönüşümü, hidrojen geri kazanımı, karbondioksit geri kazanımı sırasıyla %32,43, %61,78 ve %15,69'a eşittir.

**Anahtar Kelimeler:** Membran Reaktör, Hidrojen Üretimi, CO<sub>2</sub> Yakalama, Matematiksel Modelleme

#### Abstract

Hydrogen, an essential element for a sustainable future, plays an important role in the global energy and environmental challenges. One of the prominent methods for hydrogen production is steam methane reforming (SMR) from hydrocarbons, which offers high efficiency and scalability. Membrane reactors (MRs) have emerged as a promising technology for enhancing the SMR process by integrating hydrogen production and separation within a single unit. The novelty of this study deals with the application and mathematical modeling for the first time of both hydrogen production via steam methane reforming, and carbon dioxide capture in the same MR. The effects of two important operating parameters (reaction temperature and reaction pressure) on the MR performance are investigated parametrically. At the baseline simulation conditions (773 K and 3 bar), methane conversion, hydrogen recovery, and carbon dioxide recovery are equal to 32.43%, 61.78%, and 15.69%, respectively.

**Keywords:** Membrane Reactor, Hydrogen Production, CO<sub>2</sub> Capture, Mathematical Modeling

#### EXTENDED ABSTRACT

##### Introduction

Hydrogen (H<sub>2</sub>) production is important for sustainable energy due to disadvantages such as increasing energy demand, depletion of fossil fuels and climate change. Conventional hydrogen production methods face some disadvantages, revealing the need for new technologies. Membrane reactor (MR) technologies provide a solution to improve hydrogen production by combining thermochemical reaction and membrane separation processes. MRs have many advantages over conventional reactors, being more efficient, safe, simple, lower operating temperature, and can increase reaction kinetics. Therefore, MRs have promising potential for sustainable energy production. However, both MRs and conventional reactors produce syngas containing CO and CO<sub>2</sub>, which requires modification of the hydrogen production and energy processes to comply with the goal of low/zero CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere. In this context, in the future, CO<sub>2</sub> capture processes

simultaneously with hydrogen production in MRs may be a sustainable and promising technology.

Although there are a few studies in the literature on system-level modeling of a Membrane Reactor (MR) that includes hydrogen production and CO<sub>2</sub> capture processes. However, there are no studies on hydrogen production and separation and CO<sub>2</sub> capture at the same time in the same device. Therefore, in this study, a 1-dimensional mathematical model of an MR that includes both hydrogen production and CO<sub>2</sub> capture processes was developed using the MATLAB program. This study examined in detail the effects of important parameters (such as reaction temperature and pressure) on MR performance. This modeling study is cited as a potential route for decarbonized hydrogen production, but highlights the need for further research in this area.

##### Mathematical Modeling

A 1-dimensional mathematical model is developed using MATLAB program under some fundamental assumptions (ideal

gas, steady-state, no convection, constant pressure along the reactor, and co-current flow) to investigate the effects of some operating parameters (reaction temperature and reaction pressure) on the membrane reactor performance (methane conversion, H<sub>2</sub> recovery, and CO<sub>2</sub> recovery).

## Results and Discussion

The main objective of this theoretical study was to develop a MR to generate decarbonized hydrogen and to define the effect of some parameters (reaction temperature and reaction pressure) on the MR performance (methane conversion, hydrogen recovery, and carbon dioxide recovery). Thus, a 1-D model was developed according to three sides (Reaction, Permeation-1, and Permeation-2) for describing the behaviors of a membrane reactor (distributions of temperatures and molar flow rates) during methane steam reforming reaction.

When the change of temperatures on the all sides is investigated, the temperature in the reaction side decreased from 773 K to 764 K along the length of the reactor. While the temperature should increase again under normal conditions due to the chemical reactions taking place in the reaction side, no temperature increase was observed in the proposed MR because the produced hydrogen and carbon dioxide were constantly leaving the reaction side. It was observed that the temperature in permeation side-1 decreased from 773 K to 770 K, and in permeation side-2 the temperature remained constant at 773 K.

## Conclusion

The main findings derived from this study are given as follows:

- This theoretical investigation has validated the significance of the reaction temperature as a crucial factor that directly influences both the rate of reaction kinetics and the overall performance of the membrane reactor. When the reaction temperature increased from 723 K to 773 K, the methane conversion, hydrogen recovery, and carbon dioxide recovery were raised by 35%, 3%, and 70%, respectively.
- By also examining the impact of increasing the reaction pressure on the system, which is accountable for a favorable effect on the reaction kinetics rate and the flux of hydrogen permeation across the membrane, this theoretical investigation conclusively established that increasing the reaction pressure from 1 bar to 3 bar, the methane conversion was decreased by 21%, whereas, the hydrogen recovery and carbon dioxide recovery were increased by 60% and 100%, respectively.
- At the baseline simulation conditions (773 K and 3 bar), the methane conversion, hydrogen recovery, and carbon dioxide recovery were calculated as 32.43%, 61.78%, and 15.69%, respectively.

## 1. Giriş

Hidrojen (H<sub>2</sub>) üretimi, enerji talebindeki artış, fosil yakıtların tükenmesi ve dezavantajları (küresel ısınma ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonlarının neden olduğu iklim değişikliği) nedeniyle gelecekte sürdürülebilir enerji için çok önemlidir. Hidrojen kullanım alanına göre temiz bir enerji taşıyıcısı veya kaynağı olarak kullanılabilir [1, 2]. Günümüzde hidrojenin çoğu, termokimyasal yöntemler, özellikle bir buhar-dönüştürücü, iki su-gaz-değişim reaktörü ve bir ayırma ünitesinden oluşan geleneksel reaktörler aracılığıyla buharla dönüştürme işlemi kullanılarak çoğunlukla doğal gazdan üretilmektedir [3, 4]. Ancak geleneksel reaktörlerin hidrojen üretim performansını etkileyen bazı dezavantajları vardır. Bu dezavantajlar, karbon biriktirme, üretilen hidrojenin ortamdan anında ayrılmaması nedeniyle termodinamik denge sınırlaması, yüksek çalışma sıcaklığı koşulları ve daha fazla komponent gereksinimidir. Bu dezavantajların üstesinden gelmek için yenilikçi teknolojilerden biri olan MR teknolojileri umut vadeden bir çözümdür çünkü membran reaktörler, termokimyasal reaksiyon ve membran ayırma işlemlerini tek bir cihaz içinde birleştiren kimyasal reaktörlerdir. Bu birleşim, geleneksel reaktörlere göre çeşitli avantajlar sağlar [3, 4]. En önemli avantajı, reaksiyon bölgesinde katalizör varlığı ile üretilen hidrojenin ayrılma bölgesine bir hidrojen geçirgen membran vasıtasıyla geçişi sebebiyle reaksiyon kinetiğini geliştirmesidir. Ayrıca MR'ler, hidrojen geçirgen membranlar ile ayırma ve saflaştırma adımlarının basitleştirilmesini sağlayarak proses yoğunlaşmasına yol açar ve enerji tüketimini azaltır. Genel olarak, MR'ler geleneksel reaktörlerle karşılaştırıldığında, daha az reaktan kullanımı, geliştirilmiş emniyet, basitleştirilmiş proses, daha düşük çalışma sıcaklığı ve gelişmiş reaksiyon kinetiği gibi çeşitli avantajlara sahiptir. Bu nedenle, MR'ler, proses verimliliğinin ve sürdürülebilirliğinin iyileştirilmesi için umut vadeci potansiyel sunmaktadır [3-5]. Ancak hem MR'ler hem de konvansiyonel reaktörler karbonmonoksit (CO) ve CO<sub>2</sub> içeren sentez gazı üretmektedir, atmosfere düşük/sıfır CO<sub>2</sub> emisyonu hedefine

göre hidrojen üretimi ve enerji süreçleri değiştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, gelecekte, bir MR'de eş zamanlı olarak hidrojen üretimi ve CO<sub>2</sub> yakalama prosesleri, sürdürülebilir ve gelecek vaat eden teknolojilerden biri olabilir [6, 7].

Matematiksel modelleme, dinamik veya kararlı durum koşulları altında MR'lerin sistem davranışını tahmin etmek için kullanılan önemli bir yöntemdir. ve bu sistemlerin yüksek performansını sağlayan çalışma ve tasarım koşullarının seçilmesine yol açabilir. Literatürde çeşitli yakıtlardan hidrojen üretimi için kullanılan MR'lerin matematiksel modellenmesi ile ilgili bazı çalışmalar mevcuttur. Örneğin; Patel ve Sunol [8] üç kanaldan oluşan bir MR'nin matematiksel modelini geliştirmiştir ve kararlı durum için kütle ve enerji denge denklemlerini uygun sınır koşullarını uygulayarak çözmüştür. Bu model ile bazı önemli çalışma parametrelerinin (yakıtın konsantrasyonu, buhar-metan oranı, girişteki gaz sıcaklığı ve girişteki gaz hızı) MR performansı (metan dönüşümü ve hidrojen geri kazanımı) üzerindeki etkilerini incelemiştir. Di Marcoberardino vd. [9] bir MR'nin 1-boyutlu modelini geliştirmiştir ve bu modeli doğrulamak amacıyla farklı çalışma sıcaklıklarında (773, 823, 848 ve 873 K) ve farklı basınçlarda (400-700 kPa) MR performansı (hidrojen geri kazanımı ve yakıt dönüşümü) üzerindeki etkilerini belirlemek için deneysel çalışmalar da yapılmıştır. En iyi çalışma koşulu, %47,4 metan dönüşümü ve %28,1 hidrojen geri kazanım faktörü ile 873 K ve 500 kPa olarak belirlenmiştir. Alavi vd. [10] 1-boyutlu MR modeli geliştirmiştir ve önceden yapmış olduğu başka bir model ile karşılaştırmıştır. Damkahler sayısı, geçirgenlik sayısı ve buhar/karbon oranı gibi bazı parametrelerin MR performansı (metan dönüşümü, hidrojen geri kazanımı ve hidrojen verimi) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada hidrojen geri kazanımının maksimum elde etmek ve reaksiyon bölgelerinde kok oluşumu minimuma indirmek amacıyla optimizasyon çalışması da yapılmıştır. Sonuçlar, metan dönüşümünün ve hidrojen geri kazanımının sırasıyla % 19,8 ve % 6,8 oranında arttığını göstermiştir. Cruz ve Silva [11] hem



geleneksel reaktör hemde MR'nin 2-boyutlu modellerini geliştirmiştir. Geleneksel reaktörde 1250 K çalışma sıcaklığında %97,21 metan dönüşümü gözlenirken; MR'de 923 K çalışma sıcaklığında %99,79 metan dönüşümü gözlenmiştir. Ayrıca hidrojen verimliliği geleneksel ve membran reaktörler için sırasıyla 2,154 ve 3,731 olarak bulunmuştur. Ghasemzadeh vd. [12], yoğun bir Pd-Ag MR'nin ve eşdeğer bir geleneksel reaktörün performanslarını analiz etmek için metanol buhar dönüşümü ile hidrojen üretmek için kullanılan tek boyutlu ve izotermal bir model geliştirmiştir. Hem MR hem de geleneksel reaktörün performansları (metanol dönüşümü ve hidrojen verimi) bazı çalışma parametrelerine (süpürme faktörü, basınç ve gaz saatlik uzay hızı) göre incelenmiştir. Aynı koşullar altında MR ve geleneksel reaktör için metanol dönüşümleri sırasıyla %100 ve %91 olarak bulunmuştur. Ayrıca MR'de CO<sub>x</sub> içermeyen hidrojen üretimi %46 olarak hesaplanmıştır.

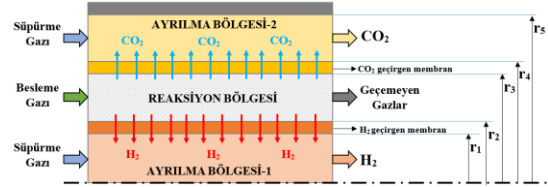
MR'lerin, CO<sub>2</sub> yakalama proses sistemleri ile bütünleştirilmesi ile ilgili olarak literatürde farklı deneysel ve teorik çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, Kian vd. [13], Pd bazlı bir metalik MR kullanarak CO<sub>2</sub> yakalama ile düşük karbonlu hidrojen üretimini deneysel olarak incelemiştir ve 673 K ve 1-4 bar çalışma koşullarında MR performanslarını (metan dönüşümü, hidrojen saflığı ve geri kazanımı, CO ve CO<sub>2</sub>'nin seçicilikleri) araştırmıştır. Sonuçlar, basınç 1 bar'dan 4 bar'a yükseldiğinde metan dönüşümünün %23'ten %42'ye çıktığını; ayrıca 4 bar'da hidrojen geri kazanımı ve saflığın >%99,999 olarak hesaplandığını göstermektedir. Yakalanan CO<sub>2</sub>, Zeolite 13X'in gramı başına 5,96 mmol CO<sub>2</sub> (262,25 mg/g) olarak bulunmuştur, bu da üretilen CO<sub>2</sub>'nin %80'inin yakalanabileceğini göstermektedir. Shirasaki vd. [14], Tokyo Gaz Şirketi'nde MR ve CO<sub>2</sub> yakalama sistemi ile hidrojen üretimi dahil olmak üzere bütünleşik sistem ile ilgili bir vaka çalışması yürütmüştür. Bu şirket, %90 yüksek CO<sub>2</sub> konsantrasyonu ile 40 Nm<sup>3</sup>/h yüksek dereceli hidrojen üreten büyük ölçekli bir MR geliştirdi ve bir gaz-sıvı ayırıcı, bir gaz kompresörü, bir tank ve bir gaz-sıvı ayırıcıdan oluşan bir CO<sub>2</sub> yakalama aparatı tasarlamıştır. Sadece %3 enerji kaybı ile hidrojen üretim sürecinde, CO<sub>2</sub> emisyonları %50 oranında azaltıldığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, CO<sub>2</sub> yakalama olmadan ve CO<sub>2</sub> yakalama ile hidrojen üretmek için sistem verimliliklerinin sırasıyla %81,4 ve %78,6 olarak hesaplandığını göstermektedir. Nalbant Atak vd. [15], dekarbonize hidrojen üretmek için bir MR ve CO<sub>2</sub> yakalama sistemi içeren bütünleşik bir sistemin termodinamik analizlerini (enerji ve ekserji) içeren bir sistem modeli geliştirmiştir. Sistem performansı (termal verim, metan dönüşümü, hidrojen verimi ve CO<sub>2</sub> verimi) ve her bileşenin ekserji yıkımı üzerinde bazı çalışma parametrelerinin (çalışma sıcaklığı, basınç ve buhar-karbon oranı) etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlar, en iyi metan dönüşümünün, hidrojen veriminin ve CO<sub>2</sub> veriminin sırasıyla %51, %67 ve %22 olarak hesaplandığını göstermektedir. Temel çalışma koşulunda (773 K ve 9 bar) termal verim %51 olarak bulunmuştur. Ovalle-Encinia vd. [16] bir CO<sub>2</sub> geçirgen MR'de eş zamanlı CO<sub>2</sub> giderimi ile hidrojen üretimi için metanın buhar reformasyonu (SRM) deneysel olarak incelemiştir ve matematiksel bir modelle analiz etmiştir. Geliştirilen model deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Yapılan simülasyon sonuçlarına göre, permeasyon sayısı (θ) ve Damkohler sayısının (Da) (sırasıyla membran CO<sub>2</sub> geçirgenliğini ve kimyasal reaksiyon hızını temsil eder) ve reaksiyon tarafındaki besleme basıncının kimyasal reaksiyon performansı üzerindeki etkileri sunulmuştur. Bu çalışmanın sonuçları, 5 atm'lik besleme basıncında ve MR'nin süpürme tarafında vakum uygulandığında, membran reaktörünün %99'un üzerinde CH<sub>4</sub> dönüşümü, H<sub>2</sub> verimi ve CO<sub>2</sub> geri kazanımı sağlayabildiğini ve sıfır CO ile esasen saf bir H<sub>2</sub> akışı üretebildiğini göstermektedir.

Yukarıda tartışılan literatür araştırmasına göre ve en iyi bilgilere göre, bir MR'lerin CO<sub>2</sub> yakalama sistemleri ile bütünleşik olarak

sistem düzeyinde modelleme üzerine birkaç çalışma olmasına rağmen, dekarbonize hidrojen üretmek için bir MR içinde hem hidrojen üretimi hemde CO<sub>2</sub> yakalama proseslerini içeren sadece bir modelleme çalışması bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, literatürdeki çalışmadan farklı olarak hem hidrojen üretimi hemde CO<sub>2</sub> yakalama proseslerini içeren bir MR'nin 1-boyutlu matematiksel modeli MATLAB programı kullanılarak geliştirilmiştir. İlave olarak bazı önemli çalışma parametrelerinin (reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon basıncı) MR performansı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

## 2. Matematiksel Model

Şekil 1'de bir MR'de hem hidrojenin üretilip ayrılması hem de CO<sub>2</sub> yakalanması ile ilgili şematik verilmiştir. Literatürden farklı olarak önerilen bu MR'de bir reaksiyon bölgesi iki ayrılma bölgesi olmak üzere eş merkezli tüpler halinde üç farklı bölge bulunmaktadır. Reaksiyon bölgesine, metan (CH<sub>4</sub>) ve sudan (H<sub>2</sub>O) oluşan bir besleme gazı gönderilir ve katalizör (Nikel-bazlı) varlığında Denklem (1)-(3)'te verilen buhar-metan dönüştürme kimyasal reaksiyonları meydana gelerek H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> ve H<sub>2</sub>O içeren bir karışım gazı elde edilir. Üretilen H<sub>2</sub>'nin bir kısmı, uygulanan hidrojen geçirgenliği itici kuvvetine bağlı olarak, Reaksiyon Bölgesi'nden Ayrılma Bölgesi-1'e hidrojen geçirgen bir membran vasıtasıyla geçerken, üretilen CO<sub>2</sub> ise Reaksiyon Bölgesi'nden Ayrılma Bölgesi-2'ye karbondioksit geçirgen bir membran vasıtasıyla geçer. Her iki membrandan da geçemeyen gazlar ise reaksiyon bölgesinin çıkışından ayrılır.



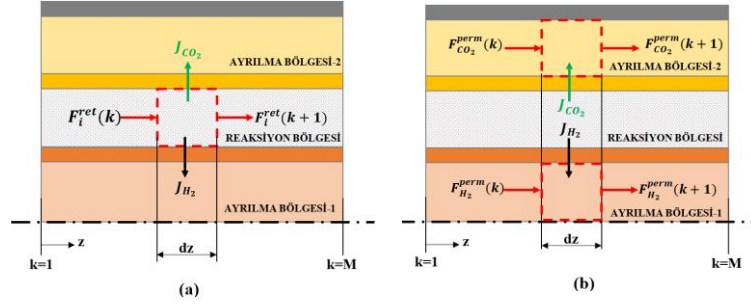
**Şekil 1.** Bir MR'de hem hidrojenin üretilip ayrılması hem de CO<sub>2</sub> yakalanmasını gösteren şematik

**Figure 1.** The schematic of both the production and separation of hydrogen and the CO<sub>2</sub> capture in an MR

Bu bölümde, reaksiyon bölgesi ve ayrılma bölgeleri için ayrıntılı kütle ve enerji korunum denklemleri uygulanarak 1-boyutlu matematiksel model geliştirilecektir. Şekil 2'de MR'deki her bir bölge için sonlu farklar elemanlarını gösteren şematik gösterilmiştir. Burada "dz", kütle ve enerji korunum denklemlerini üretmek için kullanılan akış yönündeki diferansiyel uzunluğu temsil etmektedir. MR boyunca türlerin kompozisyonlarının, sıcaklığın ve basıncın sadece ekstenel yönde değiştiği ve radyal yöndeki değişimlere ilave olarak ekstenel difüzyonun da ihmal edildiği varsayılarak, bir tapa akış varsayımı kabul edilmiştir. Tablo 1'de matematiksel modelde kullanılan hem çalışma hem de geometrik parametreler verilmiştir.

Modelde kullanılan temel varsayımlar aşağıdaki gibidir:

- Ekstenel difüzyon, ve radyal taşınım ihmal edilmiştir.
- Sıcaklık değişimi sadece ekstenel yönde dikkate alınmıştır.
- Hidrojen ve karbondioksit difüzyonu sadece radyal yönde gerçekleşir.
- Tüm gazlar ve su buharı için ideal gaz kanunu uygulanır.
- Ayrılma bölgelerindeki basınç sabittir.
- Süpürme gazı ve besleme gazı aynı yönde gönderilir (paralel akım konfigürasyonu).



**Şekil 2.** (a) Kütle ve enerji korunum denklemlerini çözmek için kullanılan sonlu farklar elemanları; (a) reaksiyon bölgesi için ve (b) ayrılma bölgeleri için

**Figure 2.** (a) Finite difference elements used to solve mass and energy conservation equations; (a) for the reaction side and (b) for the permeation side

**Tablo 1.** MR modelinde kullanılan çalışma ve geometrik parametreler [10, 16]

**Table 1.** Operating and geometric parameters used in the MR model [10, 16]

Parametre	Değer
Reaktör Uzunluğu, L	0,5 m
Ayrılma Bölgesi-2 dış yarıçapı, $r_5$	0,012 m
Ayrılma Bölgesi-2 iç yarıçapı, $r_4$	0,00875 m
Reaksiyon Bölgesi-2 dış yarıçapı, $r_3$	0,00775 m
Reaksiyon Bölgesi-2 iç yarıçapı, $r_2$	0,0045 m
Ayrılma Bölgesi-1 dış yarıçapı, $r_1$	0,0035 m
Katalizör yoğunluğu, $\rho$	260 kg/m <sup>3</sup>
Reaksiyon Bölgesinin giriş basıncı, $P_{reak\_giris}$	3 bar
Ayrılma Bölgesi-1'in giriş basıncı, $P_{ayr\_1,giris}$	1 bar
Ayrılma Bölgesi-2'nin giriş basıncı, $P_{ayr\_2,giris}$	1 bar
Giriş Çalışma Sıcaklığı, $T_{giris}$	773 K
CH <sub>4</sub> 'ün giriş molar akış debisi, $F_{CH_4,in}$	0,005 kmol/h
H <sub>2</sub> O molar oranı, $X_{H_2O}$	0,73
CO <sub>2</sub> 'nun molar oranı, $X_{CO_2}$	0,01
CO'nun molar oranı, $X_{CO}$	0,002
H <sub>2</sub> molar oranı, $X_{H_2}$	0,034
Buhar-karbon oranı	2
Hidrojen geçirgen membrane kalınlığı, $\delta$	20 $\mu$ m
Karbondioksit geçirgen membrane kalınlığı, $l$	150 $\mu$ m
Hidrojen akısı formülündeki ön üstel faktör, $B_{H_2}^0$	5,04x10 <sup>-6</sup> kmol/(m-h-kPa <sup>0.5</sup> )
Hidrojen akısı formülündeki aktivasyon enerjisi, $E_m$	8700 kJ/kmol
Karbondioksit akı denkleminin iyonik iletim parametresi, $\alpha$	0,26
Karbondioksit akı denklemindeki kısmi basınçların üstel kuvveti, $n_{CO_2}$	0,88

## 2.1. Reaksiyon Kinetiği

Buhar-metan dönüştürme işlemi sırasında meydana gelen reaksiyon mekanizması aşağıda rapor edilmiştir. Denklem (1) buhar-metan dönüşümünü, Denklem (2) su-gaz değişim reaksiyonunu ve Denklem (3) toplam reaksiyonu göstermektedir.



Denklem (1), (2) ve (3)'te verilen buhar-metan dönüştürme reaksiyonları için reaksiyon hızları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R_1 = k_{0,1} \exp\left(\frac{-E_1}{RT}\right) \left[ p_{CH_4} p_{H_2O} - \frac{p_{H_2}^3 p_{CO}}{K_{eq,1}} \right] / (p_{H_2}^{2,5} \cdot DEN^2) \quad (4)$$

$$R_2 = k_{0,2} \exp\left(\frac{-E_2}{RT}\right) \left[ p_{CO} p_{H_2O} - \frac{p_{H_2} p_{CO_2}}{K_{eq,2}} \right] / (p_{H_2} \cdot DEN^2) \quad (5)$$

$$R_3 = k_{0,3} \exp\left(\frac{-E_3}{RT}\right) \left[ p_{CH_4} p_{H_2O}^2 - \frac{p_{H_2}^4 p_{CO_2}}{K_{eq,3}} \right] / (p_{H_2}^{3,5} \cdot DEN^2) \quad (6)$$

burada  $k_{0,i}$ ,  $K_{eq,i}$  ve  $E_i$ , sırasıyla  $i$  reaksiyonu (1, 2, 3) için üstel faktör, denge sabiti ve aktivasyon enerjisidir ve bu değerler Tablo 2'de verilmiştir.  $p_j$ , her türün ( $j$ : CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) kısmi basıncını göstermektedir. Son olarak DEN, reaksiyona giren türlerin aktif katalizör alanlarına adsorpsiyon faktörüdür ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$DEN = 1 + K_{CH_4} p_{CH_4} + K_{CO} p_{CO} + K_{H_2} p_{H_2} + K_{H_2O} \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2}} \quad (7)$$

burada  $K_j$ ,  $j$  türünün katalizör yüzeyindeki adsorpsiyon sabitidir ve Tablo 3'te verilen parametreler kullanılarak Van't Hoff denklemi ile hesaplanır.

$$K_j = K_{j,0} \cdot \exp\left(\frac{-\Delta \bar{h}_i}{RT}\right) \quad (8)$$

burada  $K_{j,0}$  ön üstel faktördür.  $\Delta \bar{h}_i$ ,  $i$  türünün adsorpsiyon özgül entalpisidir.  $\bar{R}$  ve  $T$  sırasıyla evrensel gaz sabiti ve sıcaklıktır.

**Tablo 2.** Reaksiyon hızı denklemindeki sabitler [17]

**Table 2.** Constants in the reaction rate equations [17]

Reak. No., i	Ön üstel faktör, $k_{0,i}$ (kmol/(kg <sub>cat</sub> -h))	Aktivasyon enerjisi, $E_i$ (kJ/kmol)	Denge Sabiti, $K_{eq,i}$
1	4,21x10 <sup>15</sup> (bar <sup>0.5</sup> )	240100	$\exp\left(\frac{-26830}{T_{\text{ret}}}\right) + 30,114$ (bar <sup>2</sup> )
2	1,95x10 <sup>6</sup> (-)	67130	$\exp\left(\frac{4400}{T_{\text{ret}}}\right) - 4,036$ (-)
3	1,02x10 <sup>15</sup> (bar <sup>0.5</sup> )	243900	$K_{eq,1} \times K_{eq,2}$ (bar <sup>2</sup> )

**Tablo 3.** Van't Hoff denklemindeki sabitler [17]

**Table 3.** Constants in Van't Hoff equation [17]

Tür	Ön üstel faktör, $K_{j,0}$	Adsorpsiyon özgül entalpi, $\Delta\bar{h}_i$ (kJ/kmol)
CH <sub>4</sub>	6,65x10 <sup>-4</sup> (bar <sup>-1</sup> )	-38280
CO	8,23x10 <sup>-5</sup> (bar <sup>-1</sup> )	-70650
H <sub>2</sub>	6,12x10 <sup>-9</sup> (bar <sup>-1</sup> )	-82900
H <sub>2</sub> O	1,77x10 <sup>5</sup> (bar <sup>0</sup> )	88680

## 2.2. Kütlelerin Korunumu

Reaksiyon Bölgesi (Denklem (9), (10) ve (11)), Ayrılma Bölgesi-1 (Denklem (12)) ve Ayrılma Bölgesi-2 (Denklem (13)) için kütle korunum denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\frac{d\dot{F}_j^{\text{reak}}}{dz} = \rho_b A_c \sum_{i=1}^3 \vartheta_{ij} R_i \quad (j = \text{CH}_4, \text{CO}, \text{H}_2\text{O}) \quad (9)$$

$$\frac{d\dot{F}_j^{\text{reak}}}{dz} = \rho_b A_c \sum_{i=1}^3 \vartheta_{ij} R_i - J_{\text{H}_2} (2\pi r_2) \quad (j = \text{H}_2) \quad (10)$$

$$\frac{d\dot{F}_j^{\text{reak}}}{dz} = \rho_b A_c \sum_{i=1}^3 \vartheta_{ij} R_i - J_{\text{CO}_2} (2\pi r_3) \quad (j = \text{CO}_2) \quad (11)$$

$$\frac{d\dot{F}_{\text{H}_2}^{\text{ayr.1}}}{dz} = J_{\text{H}_2} (2\pi r_2) \quad (12)$$

$$\frac{d\dot{F}_{\text{CO}_2}^{\text{ayr.2}}}{dz} = J_{\text{CO}_2} (2\pi r_3) \quad (13)$$

Burada  $\dot{F}_j$  her türün (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>) için molar akış hızıdır, dz reaktörün diferansiyel uzunluğudur,  $\rho_b$  katalitik yatak yoğunluğudur,  $A_c$  kesit alanıdır,  $\vartheta_{i,j}$  i reaksiyonunda j bileşenin stokiometrik oranıdır,  $R_j$  reaksiyon hızıdır, i reaksiyon numarasıdır (1, 2, 3),  $J_{\text{H}_2}$  hidrojen geçirgen membrandan geçen hidrojen akısıdır,  $J_{\text{CO}_2}$  karbondioksit geçirgen membrandan (Sarmaryum Katkılı Seryum (SDC)- Erimiş Karbonat Membran) geçen karbondioksit akısıdır ve r membran yarıçapıdır. Hidrojen geçirgen membrandan geçen hidrojen akısı Sieverts-Fick Yasası [3] kullanılarak Denklem (14)'teki gibi hesaplanırken, karbondioksit geçirgen membrandan geçen karbondioksit akısı [19, 20] Denklem (15)'teki gibi hesaplanır.

$$J_{\text{H}_2} = \frac{B_{\text{H}_2}}{\delta} \left( p_{\text{H}_2, \text{reak}}^{0,5} - p_{\text{H}_2, \text{ayr.1}}^{0,5} \right) \quad (14)$$

$$J_{\text{CO}_2} = \frac{\bar{R}T}{4n_{\text{CO}_2} F^2 l} a \left[ p_{\text{CO}_2, \text{reak}}^{n_{\text{CO}_2}} - p_{\text{CO}_2, \text{ayr.2}}^{n_{\text{CO}_2}} \right] \quad (15)$$

burada  $B_{\text{H}_2}$  hidrojen geçirgenliğidir (Denklem (16)),  $\delta$  membran kalınlığıdır,  $p_{\text{H}_2, \text{reak}}$  ve  $p_{\text{H}_2, \text{ayr.1}}$  sırasıyla Reaksiyon Bölgesi ve Ayrılma Bölgesi-1'deki hidrojenin kısmi basıncıdır.  $\bar{R}$  evrensel

gaz sabitidir, T sıcaklıktır,  $p_{\text{CO}_2, \text{reak}}$  ve  $p_{\text{CO}_2, \text{ayr.2}}$  sırasıyla Reaksiyon Bölgesi ve Ayrılma Bölgesi-2'deki karbondioksitin kısmi basıncıdır, F Faraday sabitidir, a karbondioksit akı denkleminin iyonik iletim parametresidir (Denklem (17)) ve  $n_{\text{CO}_2}$  kısmi basınçların üstel kuvvetidir.

$$B_{\text{H}_2} = B_{\text{H}_2}^0 \cdot \exp\left(\frac{-E_m}{RT}\right) \quad (16)$$

Burada  $B_{\text{H}_2}^0$  ön üstel faktördür ve  $E_m$  geçirgenlik için aktivasyon enerjisidir.

## 2.3. Enerjinin Korunumu

Bu modelde, Reaksiyon Bölgesi (Denklem (18)), Ayrılma Bölgesi-1 (Denklem (19)) ve Ayrılma Bölgesi-2 (Denklem (20)) için enerji korunumu denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\sum_{j=1}^5 \dot{n}_j C_{p,j} \frac{dT_{\text{reak}}}{dz} = \rho A_c \sum_{i=1}^3 \vartheta_{ij} R_i (-\Delta H_i) + 2\pi [r_3 U_{\text{ayr.2}} (T_{\text{ayr.2}} - T_{\text{reak}}) - r_2 U_{\text{ayr.1}} (T_{\text{reak}} - T_{\text{ayr.1}})] \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^2 \dot{n}_j C_{p,j} \frac{dT_{\text{ayr.1}}}{dz} = 2\pi r_2 U_{\text{ayr.1}} (T_{\text{reak}} - T_{\text{ayr.1}}) \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^5 \dot{n}_j C_{p,j} \frac{dT_{\text{ayr.2}}}{dz} = 2\pi [r_5 U_{\text{ayr.2}} (T_{\text{duvar}} - T_{\text{ayr.2}}) - r_4 U_{\text{reak}} (T_{\text{ayr.2}} - T_{\text{reak}})] \quad (20)$$

burada  $C_{p,j}$  her j türünün özgül ısıdır,  $\Delta H_i$  i reaksiyonunun entalpisidir, U Reaksiyon Bölgesi, Ayrılma Bölgesi-1 ve Ayrılma Bölgesi-2 için hesaplanan ısı transfer katsayısıdır ve  $T_{\text{duvar}}$  duvar sıcaklığıdır ve 950 K'ye eşittir.

## 2.4. Membran Reaktör Performansı

MR'nin performansı burada metan dönüşümü ( $X_{\text{CH}_4}$ , Denklem (21)), hidrojen geri kazanımı ( $\varphi_{\text{H}_2}$ , Denklem (22)) ve karbondioksit geri kazanımı (Denklem (23)) olmak üzere iki farklı değişken ile tanımlanmaktadır.

$$X_{\text{CH}_4} = 100 \left( \frac{\dot{F}_{\text{CH}_4, \text{giren}} - \dot{F}_{\text{CH}_4, \text{çıkan}}}{\dot{F}_{\text{CH}_4, \text{in}}} \right) \quad (21)$$

$$\varphi_{\text{H}_2} = 100 \left( \frac{\dot{F}_{\text{H}_2, \text{çıkan}}^{\text{ayr.1}}}{\dot{F}_{\text{H}_2, \text{çıkan}}^{\text{ayr.1}} + \dot{F}_{\text{H}_2, \text{çıkan}}^{\text{reak}}} \right) \quad (22)$$

$$\varphi_{\text{CO}_2} = 100 \left( \frac{\dot{F}_{\text{CO}_2, \text{çıkan}}^{\text{ayr.2}}}{\dot{F}_{\text{CO}_2, \text{çıkan}}^{\text{ayr.2}} + \dot{F}_{\text{CO}_2, \text{çıkan}}^{\text{reak}}} \right) \quad (23)$$

burada  $\dot{F}_{\text{CH}_4, \text{giren}}$  ve  $\dot{F}_{\text{CH}_4, \text{çıkan}}$ , besleme gazındaki metan giriş molar akış hızı ve geçemeyen gazlardaki metanın çıkış molar akış hızı olarak tanımlanır.  $\dot{F}_{\text{H}_2, \text{çıkan}}^{\text{ayr.1}}$  ve  $\dot{F}_{\text{H}_2, \text{çıkan}}^{\text{reak}}$ , Ayrılma Bölgesi-1'e geçen hidrojenin çıkış molar akış hızı ve geçemeyen gazlardaki hidrojenin çıkış molar akış hızı olarak tanımlanır.  $\dot{F}_{\text{CO}_2, \text{çıkan}}^{\text{ayr.2}}$  ve  $\dot{F}_{\text{H}_2, \text{çıkan}}^{\text{reak}}$ , Ayrılma Bölgesi-2'ye geçen karbondioksit gazının çıkış molar hızı ve geçemeyen gazlardaki karbondioksit gazının çıkış molar akış hızı olarak tanımlanır.

## 3. Tartışma ve Bulgular

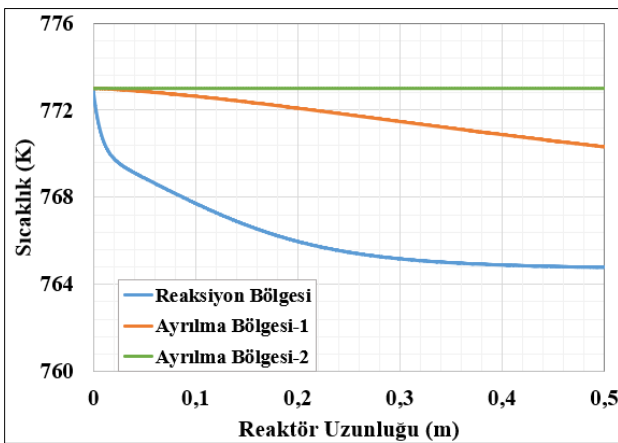
Bu bölümde, membran reaktör uzunluğu boyunca her türün molar akış hızlarının, reaksiyon ve ayrılma bölgelerindeki sıcaklıkların, metan dönüşümünün, H<sub>2</sub> geri kazanımının ve CO<sub>2</sub> geri kazanımının değişimleri verilmektedir. İlaveten bazı önemli çalışma parametrelerinin (reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon basıncı) MR performansı üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenmiştir. Tablo 4'te seçilen parametrelerin aralığı ve temel simülasyon için alınan değerleri verilmiştir.

**Tablo 4.** Modelde seçilen parametreler**Table 4.** Parameters chosen in the model

Parametre	Aralık	Temel Simülasyondaki Değer
Reaksiyon sıcaklığı, $T_{reak}$	723-773 K	773 K
Reaksiyon basıncı, $P_{reak}$	1-3 bar	3 bar

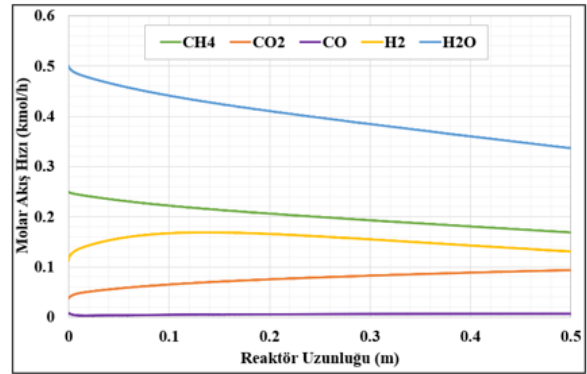
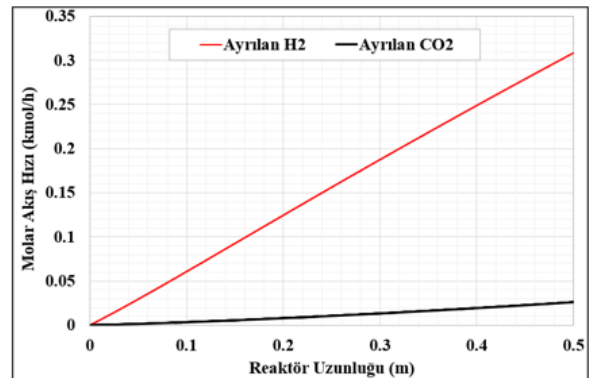
### 3.1. Reaktör Uzunluğu Boyunca Sıcaklık ve Molar Akış Hızı Dağılımları

Bu çalışmada geliştirilen 1-boyutlu MR modeli kullanılarak, reaktör uzunluğu boyunca Reaksiyon Bölgesi, Ayrılma Bölgesi-1 ve Ayrılma Bölgesi-2'deki sıcaklık (Şekil 3) ve molar akış hızı dağılımları (Şekil 4) sunulmuştur. Şekil 3'e göre, Reaksiyon Bölgesindeki sıcaklık, reaktör uzunluğu boyunca 773 K'den 764 K'e düşmüştür. Reaksiyon Bölgesinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sebebiyle normal şartlarda sıcaklığın tekrardan artması gerekirken, önerilen MR'de üretilen hidrojen ve karbondioksit sürekli bir şekilde Reaksiyon Bölgesinden ayrıldığı için sıcaklık artışı gözlemlenmemiştir. Ayrılma Bölgesi-1'de sıcaklığın 773 K'den 770 K'e düştüğü ve Ayrılma Bölgesi-2'de ise sıcaklığın 773 K'de sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi reaktör dış duvarına uygulanan ve reaksiyon sıcaklığından daha büyük sıcaklıkta (950 K) sabit sıcaklık varsayımı uygulanmasıyla açıklanabilir. Ayrılma Bölgesi-2, sabit sıcaklıkta tutulan duvara yakın bölgede olması sebebiyle, reaksiyon bölgesinde gerçekleşen endotermik kimyasal reaksiyonlar için gerek ısı duvar sıcaklığından sağlanmaktadır, bu da Ayrılma Bölgesi-2'nin reaktör uzunluğu boyunca sıcaklık değişiminin sabit olmasını açıklamaktadır. MR içindeki ısı kaybı sırasıyla reaktör duvarı -> Ayrılma Bölgesi-2 -> Reaksiyon Bölgesi-> Ayrılma Bölgesi-1'ne doğru gerçekleşmektedir.

**Şekil 3.** Reaktör uzunluğu boyunca her bölgedeki sıcaklık dağılımı**Figure 3.** Temperature distribution in each region along the reactor length

Şekil 4-(a) incelendiğinde, Reaksiyon Bölgesinde, reaktör uzunluğu boyunca buhar metan dönüştürme reaksiyonu

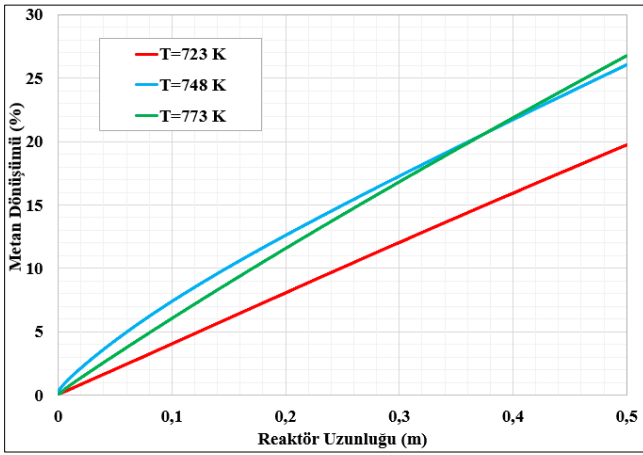
nedeniyle  $CH_4$  ve  $H_2O$  molar akış hızları yaklaşık %7 oranında azalırken, su-gaz değişim reaksiyonu nedeniyle  $CO$  molar akış hızındaki değişiklik ihmal edilebilir. İlaveten,  $CO_2$  ve  $H_2$  molar akış hızlarının kimyasal reaksiyonlara göre artması beklenirken, önerilen membran reaktörde hem  $H_2$  hem de  $CO_2$  gazlarının sürekli Reaksiyon Bölgesinden ayrılmaları sebebiyle,  $H_2$  molar akış hızında önce üretim kaynaklı olarak 0,18 m reaktör uzunluğuna kadar %49 oranında artış gözlemlenirken ardından membrandan Ayrılma-Bölgesi-1'e geçişi sebebiyle %22,44 oranında azalış gözlemlenmiştir. Reaksiyon bölgesinde,  $CO_2$  molar akış hızında ise membrandan geçiş miktarının hidrojene kıyasla daha az olması sebebiyle 0,03844 kmol/h'den 0,09364 kmol/h'ye artış gözlemlenmiştir. Şekil 4-(b) incelendiğinde, Ayrılma Bölgesi-1 için  $H_2$  geçişi incelendiğinde molar akış hızı 0'dan 0,29 kmol/h'e yükselirken, Ayrılma Bölgesi-2 için  $CO_2$  geçişi incelendiğinde ise molar akış hızı 0'dan 0,02 kmol/h'ye yükselmiştir.

**(a)****(b)****Şekil 4.** Reaktör uzunluğu boyunca molar akış hızı dağılımı; (a) Reaksiyon bölgesi ve (b) Ayrılma Bölgesi-1 için  $H_2$  ve Ayrılma Bölgesi-2 için  $CO_2$ **Figure 4.** Molar flow rate distribution along the reactor length; (a) Reaction Side and (b)  $H_2$  in Permeation Side-1 and  $CO_2$  in Permeation Side-2

### 3.2. Reaksiyon Sıcaklığının Membran Reaktör Performansı Üzerindeki Etkisi

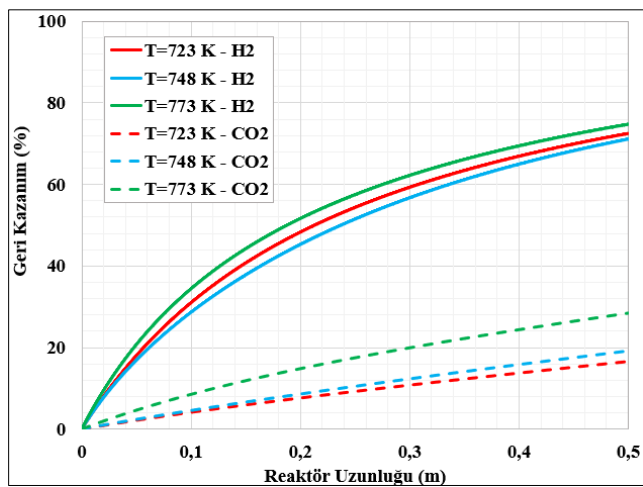
Reaksiyon sıcaklığı, MR'nin performansını doğrudan etkileyen kritik bir parametredir, çünkü MR'de kullanılan reaksiyon kinetik denklemlerinin, membranlardan nüfuz eden  $H_2$  ve  $CO_2$  akış denklemleri büyük ölçüde çalışma sıcaklığına bağlıdır. Genel olarak, sıcaklığın artmasıyla, reaksiyon hızları ve membrandan geçen gaz akışı da artar. Ancak çalışma sıcaklığı, membranın ısı dayanıklılığı dikkate alınarak ayarlanmalıdır. Şekil 5 ve Şekil 6'da reaksiyon basıncı 3 bar'a eşit iken reaksiyon sıcaklığının metan dönüşümü ve hidrojen ve karbondioksit geri kazanımı üzerindeki

etkileri verilmiştir. Tablo 5'te sıcaklığın değişimine göre metan dönüşümü, hidrojen geri kazanımı ve karbondioksit geri kazanımı değerleri verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde, sıcaklığın 723 K'den 773 K'e yükselirken, metan dönüşümünün yaklaşık %35 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Ancak sıcaklığın 748 K ile 773 K arasında metan dönüşümü üzerindeki etkisinin neredeyse olmadığı görülmüştür. Bu durum metanın katalizör ile teması sonucunda doğrudan reaksiyonların başlaması ve belirli bir sıcaklık üzerinde stabil kalması ile açıklanabilir. Şekil 6 incelendiğinde, sıcaklığın 723 K'den 773 K'e artması ile, H<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> geri kazanımları sırasıyla %3 ve %70 oranında artış gözlemlenmiştir. Ancak, H<sub>2</sub> geri kazanımının sıcaklığa bağlı değişimi incelendiğinde, 3 bar basınçta ve reaktör uzunluğu 0,20 m olduğunda 723 K'de %48,3 iken 748 K'de %45,3 bulunmuştur. Bunun sebebi matematiksel modelde ele alınan membran tipi ve bu membrana bağlı Denklem 16'da verilen hidrojen geçirgenlik parametrelerinden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Genel olarak membran reaktör çalışmaları incelendiğinde sıcaklık artışının membran türüne bağlı olarak belirli bir sıcaklık değerine artarken, H<sub>2</sub> geçirgenliğinin artması gözlemlenmektedir.



Şekil 5. Reaksiyon basıncı 3 bar iken metan dönüşümü üzerinde sıcaklığın etkisi

Figure 5. Effect of temperature on methane conversion when the reaction pressure is 3 bar



Şekil 6. Reaksiyon basıncı 3 bar iken hidrojen ve karbondioksit geri kazanımları üzerinde sıcaklığın etkisi

Figure 6. Effect of temperature on hydrogen and carbon dioxide recoveries when the reaction pressure is 3 bar

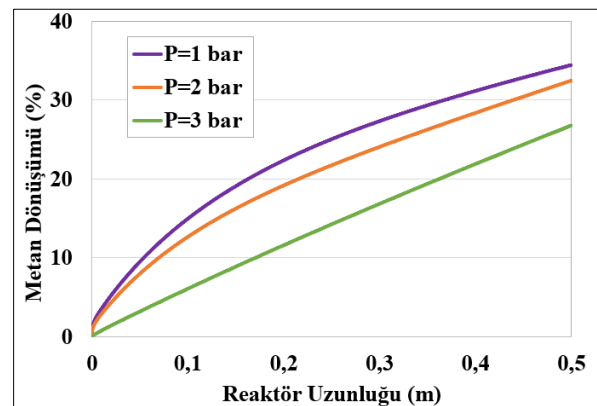
Tablo 5. Sıcaklığın değişimine göre metan dönüşümü, hidrojen geri kazanımı ve karbondioksit geri kazanımı değerleri

Table 5. Methane conversion, hydrogen recovery and carbon dioxide recovery values according to temperature change

T (K)	$X_{CH_4}$ (%)	$\varphi_{H_2}$ (%)	$\varphi_{CO_2}$ (%)
723	19,72	16,59	72,49
748	26,04	19,18	71,12
773	26,75	28,45	74,75

### 3.3. Reaksiyon Basıncının Membran Reaktör Performansı Üzerindeki Etkisi

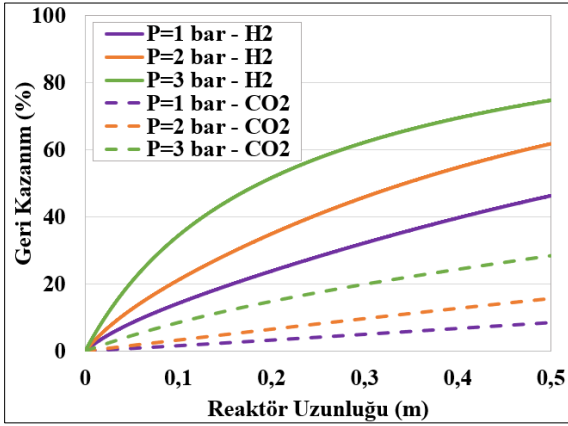
Reaksiyon basıncı, MR boyunca reaksiyon hızlarını ve membranlardan hidrojen ve karbondioksit geçirgenlik akısını (Denklem (14) ve Denklem (15)) etkileyen önemli bir parametredir. Reaksiyon basıncı yükseldiğinde, membrandan hidrojen ve karbondioksit geçirgenliğini sağlayan itici gücün artması sonucu, geçirgenlik artar. Şekil 7 ve Şekil 8'de reaksiyon sıcaklığının 773 K olduğu durumda metan dönüşümü ve hidrojen ve karbondioksit geri kazanımı üzerinde reaksiyon basıncının etkileri gösterilmiştir. Tablo 6'da basıncın değişimine göre metan dönüşümü, hidrojen geri kazanımı ve karbondioksit geri kazanımı değerleri verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, reaksiyon basıncının 1 bardan 3 bara yükselmesiyle metan dönüşümünün %21 oranında düşüş gözlemlenmiştir. 773 K ve 0,20 m reaktör uzunluğunda, reaksiyon basıncı 1 bar'dan 3 bar'a yükseldiğinde, metan dönüşümü %22'den %11,56'ya azalmıştır. Şekil 8 incelendiğinde ise, hidrojen ve karbondioksit geri kazanımının sırasıyla %60 ve %100'ün üzerinde bir artış gözlemlenmiştir. 773 K ve 0,20 m reaktör uzunluğunda, reaksiyon basıncı 1 bar'dan 3 bar'a yükseldiğinde, %23,84'ten %51,64'e artarken, karbondioksit geri kazanımı %3,29'dan %14,84'e artmıştır. Geri kazanım değerlerinde artışın sebebi, reaksiyon basıncının artması ile Reaksiyon Bölgesinden Ayrılma Bölgesi-1 ve Ayrılma Bölgesi-2'ye geçecek hidrojen ve karbondioksitin itici gücünün artması ile açıklanabilir. Reaksiyon basıncının artmasının metan dönüşümü üzerinde olumsuz ancak hidrojen ve karbondioksit geri kazanımları üzerinde olumlu etkisi vardır. Bu durum reaktör tasarımını doğrudan etkilemektedir. Gelecekteki çalışmalarda reaktör tasarlanacağında bu performans değerleri (metan dönüşümü, hidrojen ve karbondioksit geri kazanımları) üzerinde olumlu yönde etkileyecek en uygun parametre değerleri optimizasyon çalışmaları ile belirlenecektir.





**Şekil 7.** Reaksiyon sıcaklığı 773 K iken metan dönüşümü üzerinde basıncın etkisi

**Figure 7.** Effect of reaction pressure on methane conversion when the reaction temperature is 773 K



**Şekil 8.** Reaksiyon sıcaklığı 773 K iken hidrojen ve karbondioksit geri kazanımları üzerinde basıncın etkisi

**Figure 8.** Effect of reaction pressure on hydrogen and carbon dioxide recoveries when the reaction temperature is 773 K

**Tablo 6.** Basıncın değişimine göre metan dönüşümü, hidrojen geri kazanımı ve karbondioksit geri kazanımı değerleri

**Table 6.** Methane conversion, hydrogen recovery and carbon dioxide recovery values according to pressure change

T (K)	$X_{CH_4}$ (%)	$\varphi_{H_2}$ (%)	$\varphi_{CO_2}$ (%)
1	34,42	46,30	8,51
2	32,43	61,78	15,70
3	26,75	74,75	28,45

#### 4. Sonuçlar

Bu teorik çalışmanın temel amacı, dekarbonize hidrojen üretmek için bir MR geliştirmek ve bazı parametrelerin (reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon basıncı) MR performansı (metan dönüşümü, hidrojen geri kazanımı, karbondioksit geri kazanımı) üzerindeki etkisini tanımlamaktır. Böylece, bir membran reaktörün metan buharı reforming reaksiyonu sırasındaki davranışlarını (sıcaklıkların ve molar akış hızlarının dağılımları) açıklamak için üç tarafa (Reaksiyon, Ayrılma-1 ve Ayrılma-2) göre 1 boyutlu bir model geliştirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen başlıca bulgular şu şekildedir:

- Bu teorik araştırma, hem reaksiyon kinetik hızlarını hem de MR'nin genel performansını doğrudan etkileyen çok önemli bir faktör olarak reaksiyon sıcaklığının önemini doğrulamıştır. Reaksiyon sıcaklığı 723 K'den 773 K'ye yükseldiğinde metan dönüşümü, hidrojen geri kazanımı ve karbon dioksit geri kazanımı sırasıyla %35, %3 ve %70 arttı.
- Reaksiyon kinetik hızı ve membran boyunca hidrojen geçirgenliği akışı üzerinde olumlu bir etkiden sorumlu olan sistem üzerindeki reaksiyon basıncını artırmanın etkisini de inceleyerek, bu teorik araştırma, reaksiyon basıncını 1 bar'dan 3 bar'da metan dönüşümü %21 azalırken, hidrojen geri kazanımı %60 ve karbondioksit geri kazanımı %100 arttı.
- Temel simülasyon koşullarında (773 K ve 3 bar), metan dönüşümü, hidrojen geri kazanımı ve karbondioksit geri

kazanımı sırasıyla %32,43, %61,78 ve %15,69 olarak hesaplanmıştır.

Gelecekteki araştırma çalışmalarında, sıcaklık ve basıncın, reaktör tasarımında ve çalışma koşullarının belirlenmesinde önemli bir etkisi vardır. Metan dönüşümü, hidrojen geri kazanımı ve karbondioksit geri kazanımını olumlu yönde etkileyecek en uygun parametre değerleri optimizasyon çalışmaları ile belirlenebilir. İlaveten, hidrojen üreten bir MR sisteminin bir karbondioksit yakalama sistemi ile birleştirilmesiyle elde edilen sistemin ayrıntılı ekonomik analizleri gerçekleştirilebilir ve bu çalışmada önerilen yaklaşım ile karşılaştırma çalışmaları gerçekleştirilebilir.

#### Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Kaynaklar

- [1] Acar, C., Dincer, I. 2020. The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming, *International Journal of Hydrogen Energy*, Cilt. 45, No. 5, s. 3396-3406, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.10.149
- [2] Cho, H. H., Strezov, V., Evans, T. J. 2023. A review on global warming potential, challenges and opportunities of renewable hydrogen production technologies, *Sustainable Materials and Technologies*, Cilt. 35, e00567, DOI: 10.1016/j.susmat.2023.e00567
- [3] Amiri, T. Y., Ghasemzadeh, K., Iulianelli, A. 2020. Membrane reactors for sustainable hydrogen production through steam reforming of hydrocarbons: A review. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, Cilt. 157, 108148, DOI: 10.1016/j.cep.2020.108
- [4] Nalbant Atak, Y., Colpan, C. O., Iulianelli, A. 2021. A review on mathematical modeling of packed bed membrane reactors for hydrogen production from methane. *International Journal of Energy Research*, Cilt. 45, No. 15, s. 20601-20633, DOI: 10.1002/er.7186
- [5] Drioli, E., Stankiewicz, A.I., Macedonio, F. 2011. Membrane engineering in process intensification—An overview. *Journal of Membrane Science*, Cilt. 380, No. 1-2, s. 1-8, DOI: 10.1016/j.memsci.2011.06.043
- [6] Wassie, S. A., Medrano, J. A., Zaabout, A., Cloete, S., Melendez, J., Tanaka, D. A. P., Amini, S., Annaland, M. v. S.A., and Gallucci, F. 2018. Hydrogen production with integrated CO2 capture in a membrane assisted gas switching reforming reactor: proof-of-Concept. *International Journal of Hydrogen Energy*, Cilt. 43, No. 12, s. 6177-6190, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.040
- [7] Elavarasan, R. M., Pugazhendhi, Irfan, R., Mihet-Popa, M., L., Khan, I. A., Campaña, P. E. 2022. State-of-the-art sustainable approaches for deeper decarbonization in Europe—An endowment to climate neutral vision. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt. 159, 112204, DOI: 10.1016/j.rser.2022.112204
- [8] Patel, K. S., Sunol, A. K. 2007. Modeling and simulation of methane steam reforming in a thermally coupled membrane reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, Cilt. 32, No.13, s. 2344-2358, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.03.004
- [9] Di Marcoberardino, G., Sosio, F., Manzolini, G., Campanari, S. 2015. Fixed bed membrane reactor for hydrogen production from steam methane reforming: Experimental and modeling approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, Cilt. 40, No.24, s. 7559-7567, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.11.045
- [10] Alavi, M., Eslamloueyan, R., Rahimpour, M. R. 2018. Multi objective optimization of a methane steam reforming reaction in a membrane reactor: considering the potential catalyst deactivation due to the hydrogen removal. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, Cilt. 16, No. 2, 20170066, DOI: 10.1515/ijcre-2017-0066
- [11] Cruz, B. M., da Silva, J. D. 2017. A two-dimensional mathematical model for the catalytic steam reforming of methane in both conventional fixed-bed and fixed-bed membrane reactors for the Production of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, Cilt. 42, No. 37, s. 23670-23690, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.019
- [12] Ghasemzadeh, K., Liguori, S., Morrone, P., Iulianelli, A., Piemonte, V., Babaluo, A. A., Basile, A. 2013. H2 production by low pressure methanol steam reforming in a dense Pd-Ag membrane reactor in co-current flow configuration: experimental and modeling analysis. *International journal of hydrogen energy*, Cilt. 38, No. 36, s. 16685-16697, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.06.008

- [13] Kian, K., Liguori, S., Pilorgé, H., Crawford, J. M., Carreon, M. A., Martin, J. L., Grimm, R.L., and Wilcox, J. 2021. Prospects of CO<sub>2</sub> capture via 13X for low-carbon hydrogen production using a Pd-based metallic membrane reactor. *Chemical Engineering Journal*, Cilt. 407, 127224, DOI: 10.1016/j.cej.2020.127224
- [14] Shirasaki, Y., Yasuda, I. 2013. Membrane reactor for hydrogen production from natural gas at the Tokyo Gas Company: A case study. In *Handbook of Membrane Reactors*, Woodhead Publishing, s. 487-507.
- [15] Atak, Y. N., Colpan, C. O., Iulianelli, A. 2022. Energy and exergy analyses of an integrated membrane reactor and CO<sub>2</sub> capture system to generate decarbonized hydrogen. *Energy Conversion and Management*, Cilt. 272, 116367, DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116367
- [16] Ovalle-Encinia, O., Wu, H. C., Chen, T., Lin, J. Y. 2022. CO<sub>2</sub>-permselective membrane reactor for steam reforming of methane. *Journal of Membrane Science*, Cilt. 641, 119914, DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119914
- [17] Xu, J., Froment, G. F. 1989. Methane steam reforming, methanation and water-gas shift: I. Intrinsic kinetics. *AIChE journal*, Cilt. 35, No. 1, s. 88-96, DOI: 10.1002/aic.690350109
- [18] Norton, T. T., Lu, B., Lin, Y. S. 2014. Carbon dioxide permeation properties and stability of samarium-doped-ceria carbonate dual-phase membranes. *Journal of membrane science*, Cilt. 467, s. 244-252, DOI: 10.1016/j.memsci.2014.05.026
- [19] Dong, X., Wu, H. C., Lin, Y. S. 2018. CO<sub>2</sub> permeation through asymmetric thin tubular ceramic-carbonate dual-phase membranes. *Journal of Membrane Science*, Cilt. 564, s. 73-81, DOI: 10.1016/j.memsci.2018.07.012



ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

# Uydu Esnek Kanatlarının Artık Titreşim Kontrolüne Yönelik Yapay Arı Kolonisi Ve Guguk Kuşu Optimizasyon Algoritmaları ile LQR Denetleyici Tasarımı

## Artificial Bee Colony and Cuckoo Search Optimization Algorithms Based LQR Controller Design for Residual Vibration Control of Satellite Flexible Wings

Ferhat Kaya<sup>1\*</sup>, Çağlar Conker<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İskenderun Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Hatay, TÜRKİYE

<sup>2</sup> İskenderun Teknik Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Hatay, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author\*: ferhatkaya.mfibe18@iste.edu.tr

### Öz

Sunulan çalışma, esnek bir uydu kanadı için doğrusal kuadratik regülatör (LQR) denetleyici parametrelerinin çok amaçlı optimizasyonunda Yapay Arı Kolonisi ve Guguk Kuşu metasezgisel optimizasyon algoritmalarının tasarımı ve performans analizi hakkında ayrıntılar sunmaktadır. Kontrol yanıtlarının önemli parametreleri göz önünde bulundurularak yeni bir çoklu amaç fonksiyonu tasarlanmış ve Yapay Arı Kolonisi (ABC) ve Guguk Kuşu (CS) metasezgisel algoritmaları ile optimize edilmiştir. Algoritmaların başlangıç değerleri için farklı farklı üçer konfigürasyon belirlenerek bu konfigürasyonlar üç farklı (10,50 ve 100) popülasyon boyutu değerleri için 100 iterasyonda simülasyonlar yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daha başarılı kontrol yanıtlarına ulaşan konfigürasyonlar ile literatürde aynı düzenek ile yapılan bazı çalışmalar karşılaştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürde mevcut bulunan, PSO, m-PSO algoritmaları ve geleneksel tasarlanmış LQR denetleyici çalışmaları ile kıyaslanarak önerilen yaklaşımın etkinliği gösterilmiştir. Önerilen çoklu amaç fonksiyonu ve Guguk Kuşu Algoritması, esnek uydu kanadı sapma açısında PSO algoritmasına kıyasla %37,56 ve m-PSO algoritması ile karşılaştırıldığında ise %61,87 oranında daha üstün bir performans göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Uydu Esnek Kanadı, Çok Amaçlı Optimizasyon, LQR, Yapay Arı Kolonisi, Guguk Kuşu Algoritması

### Abstract

The present study provides details on the design and performance analysis of the Artificial Bee Colony (ABC) and Cuckoo Search (CS) metaheuristic optimization algorithms for the multi-objective optimization of linear quadratic regulator (LQR) controller parameters for a flexible satellite wing. A novel multi-objective function was designed, taking into account significant parameters of control responses, and was optimized using ABC and CS metaheuristic algorithms. Different initial configurations were determined for the algorithms, and simulations were performed for 100 iterations for three different (10, 50, and 100) population sizes. The results obtained were compared to identify the configurations that led to more successful control responses. These configurations were then compared to some studies in the literature that used the same system. The obtained results were compared with the existing literature on PSO, m-PSO algorithms, and traditionally designed LQR controller studies to demonstrate the effectiveness of the proposed approach. The proposed multi-objective function and the Cuckoo Algorithm showed a superior performance of 37.56% compared to the PSO algorithm and 61.87% compared to the m-PSO algorithm in flexible satellite wing angle.

**Keywords:** Flexible Satellite Wings, Multi-Objective Optimization, LQR, Artificial Bee Colony, Cuckoo Search

### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction

Spacecraft design and development are of critical importance for both military and civilian purposes. The utilization of flexible wing structures and flexible linkage components provides significant advantages for spacecraft in numerous space missions. However, these flexible structures can reduce performance due to residual vibrations emerging from their motion and structure. In the presented study, a flexible link manipulator developed by Quanser has been utilized as a prototype for a flexible satellite wing. The LQR (Linear Quadratic Regulator) control technique is used to eliminate the residual vibrations of the system. Traditionally, LQR control weighting

matrices are determined by expert designers. The aim is to ensure that the flexible link manipulator system reaches the desired angular position as soon as possible and to eliminate tip deflections. A new multi-objective function has been designed by considering the important parameters of control responses suitable for this aim. It has been optimized using Artificial Bee Colony (ABC) and Cuckoo Search (CS) metaheuristic optimization algorithms.

The ABC and CS algorithms were examined in three different population sizes (10, 50, and 100) and 100 iterations to determine the optimal LQR control weighting matrices. The

DOI:10.21205/deufmd.2024267716

Atf şekli / How to cite:

Kaya, F., Conker, C. (2024). Uydu Esnek Kanatlarının Artık Titreşim Kontrolüne Yönelik Yapay Arı Kolonisi Ve Guguk Kuşu Optimizasyon Algoritmaları ile LQR Denetleyici Tasarımı. DEUFMD, 26(77), 316-324.

Geliş Tarihi / Received: 09.05.2023

Kabul Tarihi / Accepted: 06.11.2023

initial parameters of the algorithms were obtained through simulation studies for three different configurations. To demonstrate the effectiveness of the designed objective function with the existing literature on PSO, m-PSO algorithms, and traditionally designed LQR controller studies.

### Materials and Methods

The mathematical model of the system has been obtained using the Lagrange method, and the motion equations are presented in Eq. 1 and Eq. 2, while the system parameter values are provided in Table 1. These equations define the angular position and tip angle in the system. LQR, one of the closed-loop control approaches known for its stable structure and success in being affected by disturbances, has been employed. LQR Weight matrices are determined using Artificial Bee Colony (ABC) and Cuckoo Search (CS) metaheuristic optimization algorithms. Both algorithms aim to efficiently solve optimization problems based on swarm intelligence.

In Chapter 2, the theoretical background of the motion equations, control structure, designed multi-objective function, and metaheuristic algorithms has been detailed.

### Results and Discussion

The parameters for the initialization of the optimization algorithms, specifically the discovery rate of foreign eggs (pa) and the step size (alfa) for the Cuckoo Search Algorithm, were selected as (0.2-0.2), (0.5-1), and (0.7-5), respectively, to create three different configurations. The configurations and the obtained results are shown in Table 3. Similarly, for the Artificial Bee Colony algorithm, three configurations were determined for the modification rate (mr) and termination criterion (A) parameters as (0.3-600), (0.5-200), and (0.8-400), respectively. These configurations are shown in Table 4. These configurations were examined separately for population sizes of 10, 50, and 100, each with 100 iterations, and the obtained results are presented in tables and graphs. It has been observed that within the scope of the study, the Artificial Bee Colony algorithm achieved the lowest objective function value with Configuration-3 at a population size of 100, while the Cuckoo Search algorithm reached the lowest objective function value with Configuration-1 at a population size of 100.

Furthermore, the effectiveness of the designed structure is demonstrated by comparing it with similar studies using the LQR controller found in the literature. It has been observed that the control responses obtained by the ABC and CS algorithms are

more successful compared to the compared studies, and they enhance the control performance. Table 5 presents the Q (q1, q2, q3, q4), R weighting, and gain (K) matrices used for comparison with ABC, CS, and the studies in the literature. The results obtained for the flexible wing tip angle and servo angle are presented in Figure 7 and Figure 8, respectively.

As a result, it has been observed that the proposed multi-objective function and the optimization algorithms used are successful in satellite flexible wing vibration control, and better results have been achieved compared to other studies examined in the literature.

### Conclusion

This paper presents the design and performance analysis of ABC, and CS algorithms in optimizing the weighting matrices of the LQR controller for a flexible satellite wing. The main control aim is to suppress residual vibrations due to the system's movement while reaching the desired angular reference as quickly as possible. To address this problem and to provide a solution, a multi-objective function is designed to account for important parameters of the control response. The obtained results were compared with the existing literature on PSO, m-PSO algorithms, and traditionally designed LQR controller studies to demonstrate the effectiveness of the proposed approach. The findings obtained from the end of the study results are listed below;

- The effectiveness of the designed objective function and the CS and ABC algorithms has been demonstrated in optimizing the LQR control weighting matrices and controlling the vibrations of flexible space wings.
- There is a difference of 0.0792% between the settling times of servo angles for the CS and ABC algorithms. The CS algorithm provides a more successful settling time.
- When examining the settling times of servo angles, the CS algorithm shows differences of 82.03% compared to Traditional LQR, 49.80% compared to m-PSO, and 26.14% compared to PSO.
- For the flexible wing structure, the best settling time performance is provided by the Cuckoo Search algorithm. The Cuckoo Search algorithm shows differences of 37.56% compared to PSO, 61.87% compared to m-PSO, and 161.28% compared to the traditional method.

## 1. Giriş

Askeri ve sivil amaçlar için kullanılan uzay araçlarının tasarımı ve geliştirilmesi güncelliğini koruyan ve araştırmacıların üzerine çalıştığı önemli konulardan birisidir. Uzay teknolojilerinin gelişmesiyle, geliştirilen hava taşıtlarının yapısında birçok yenilik üzerine çalışmalar yapılmaktadır [1]. Uzay manipülatörleri genellikle esnek bağlantılı bileşenler ve esnek kanat yapıları içermektedir. Esnek bağlantılı sistemler, hafif ağırlıkları, düşük ataletleri, düşük enerji tüketimleri, yüksek manevra kabiliyetleri ve iş verimlilikleri nedeniyle birçok uzay görevinde kullanılabilirler [2]. Esnek kanatlara sahip uyduların hareketi sırasında ve sonrasında meydana gelen titreşimler, kanat yapılarında deformasyona yol açabilir. Artık titreşimler uydunun manevra kabiliyetini, ötelenmesini ve dönmesine sebep olabilmekte ve uydunun performansını

doğrudan etkilemektedir [1]. Bu nedenle, söz konusu sistemlerde oluşan artık titreşimlerin etkin bir şekilde giderilmesi ve yüksek maliyetli uzay görevlerinin başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için kritik bir öneme sahiptir.

Esnek sistemlerin artık titreşimlerinin yok edilmesi için birçok kontrol tekniği geliştirilmiş olup ilgili problemin çözümüne yönelik çalışmalara devam edilmektedir. Temel olarak titreşim kontrolü için açık çevrim (ileri beslemeli) ve kapalı çevrim (geri beslemeli) olmak üzere iki farklı kontrol yaklaşımı bulunmaktadır. Açık çevrim; sistem çıktısının girdi sinyalinin üzerinde etkisi bulunmadan, sisteme uygun kontrol sinyalinin oluşturulması ile yapılan kontrol yaklaşımıdır. Esnek sistemler için kullanılan ileri beslemeli kontrol uygulamaları olarak girdi şekillendirme çalışmaları [3,4] önemli bir yer tutmaktadır. Kapalı çevrim kontrol yöntemleri ise sistem çıktısının, girdi sinyali üzerinde etkisinin olduğu kontrol yaklaşımlarıdır.

Literatürde esnek yapıli sistemlerin titreşim kontrolü için kayan kipli kontrol [5], PID kontrol [6] gibi geri beslemeli kontrol yaklaşımlarıyla yapılan çalışmalar mevcuttur. Esnek sistemlerin titreşim kontrolüne akıllı çözümleri üretmek için yapay sinir ağları [7], bulanık mantık [8] gibi yapay zeka yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Ayrıca kontrol yaklaşımlarının avantajlarından yararlanılarak kontrol performanslarını daha iyi noktalara taşımak için en az iki tekniğin beraber kullanılarak yapıldığı kayan kipli kontrol+ girdi şekillendirici [9], bulanık mantık + PID [10], LQR+ metasezgisel optimizasyon algoritmaları [11] gibi hibrit yöntemler ilgili referanslarla sunulmaktadır.

Çalışma kapsamında geri beslemeli kontrol yaklaşımı olan doğrusal kuadratik regülatör (LQR) kontrol tekniği kullanılmaktadır [11-17]. Bu teknik, geleneksel olarak ağırlık (Q ve R) matrislerinin uzman tasarımcı tarafından belirlenmesi ile yapılan bir kontrol yaklaşımıdır. Geleneksel yaklaşım kontrol tekniğinin her zaman en iyi sonucu vereceğini garanti etmemektedir. Bu nedenle, LQR kontrol ağırlık matrisleri, Yapay Arı Kolonisi ve Guguk Kuşu metasezgisel optimizasyon algoritmaları ile belirlenmektedir.

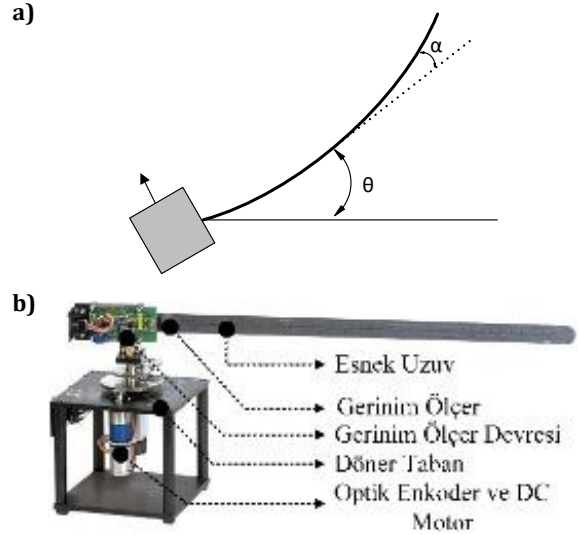
Sunulan çalışma ile Quanser firması tarafından geliştirilen esnek kol sistemi bir uydu kanat prototipi olarak düşünülerek titreşim kontrolü yapılmaktadır. İlgili düzeneğin literatürde uydu kanat sistemlerinin incelenmesi için kullanıldığı çalışmalar mevcuttur [1,9,18]. Sistemin servo açısı istenilen konuma en hızlı sürede gelirken esnek uzuvda meydana gelecek artık titreşimlerin olabildiğince hızlı bastırılması için LQR kontrol tekniği kullanılmıştır. Kontrol tekniğinin ağırlık matrisleri yapay arı kolonisi (ABC) ve Guguk Kuşu (CS) sürü tabanlı metasezgisel optimizasyon algoritmaları üç farklı popülasyon boyutu değerinde (10-50-100) ve 100 iterasyonda incelenerek belirlenmektedir. Algoritmaların başlangıç parametreleri ise belirlenmiş üçer farklı konfigürasyon için benzetim çalışmaları sonucu elde edilmiştir. Çalışma ile uydu esnek kanat sistemin ayrıntıları, LQR tekniği ve optimizasyon algoritmaların teorik detayları ve elde edilen kontrol sonuçları detaylı olarak sunulmaktadır. Ayrıca LQR denetleyicinin geleneksel olarak [15], parçacık sürü optimizasyonu (PSO) [16] ve modifiye parçacık sürü optimizasyonu (m-PSO) [17] ile tasarlanan üç farklı çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında uydu esnek kanadı prototipi olarak Quanser tarafından tasarlanmış bir esnek manipülatör kullanılmaktadır. Alt bölümlerde; kullanılan deney düzeneği, tasarlanan kontrol yapısı, kullanılan optimizasyon algoritmaları hakkında teorik detaylar sunulmaktadır.

### 2.1. Uydu Esnek Kanat Yapısı

Kullanılan prototip, DC servo motor tarafından tahrik edilen yatay düzlemde hareket eden esnek bir uzuvdan oluşmaktadır. Sistemde DC servo motorun açıl konumu ( $\theta$ ) enkoder ile, esnek uzvun uç açısını ( $\alpha$ ) gerinim ölçer ile ölçülmektedir. Esnek kol sisteminin ayrıntıları ile şematik gösterimi Şekil 1 ile sunulmaktadır [19].



Şekil 1. Uydu esnek kanat sisteminin a) şematik b) mekanik model

Figure 1. a) Schematic illustration and b) Mechanical model of the satellite flexible wing system

Kullanılan prototipin matematik modeli karmaşık robotik sistemlerinin modellemesinde iyi sonuç verdiği bilinen Lagrange yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Hareket denklemlerinin içerdiği ifadeler ve sayısal değerler Tablo 1 ile sunulmaktadır. Hareket denklemlerinin üretilmesine yönelik detaylara Quanser tarafından sunulan ürün kataloğundan [19] ulaşılabilmektedir. Deney düzeneğinin hareket denklemleri Eş. 1 ve Eş. 2 ile sunulmaktadır.

$$\ddot{\theta} = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}}\dot{\theta} + \frac{K_s}{J_{eq}}\alpha + \frac{1}{J_{eq}}\tau \quad (1)$$

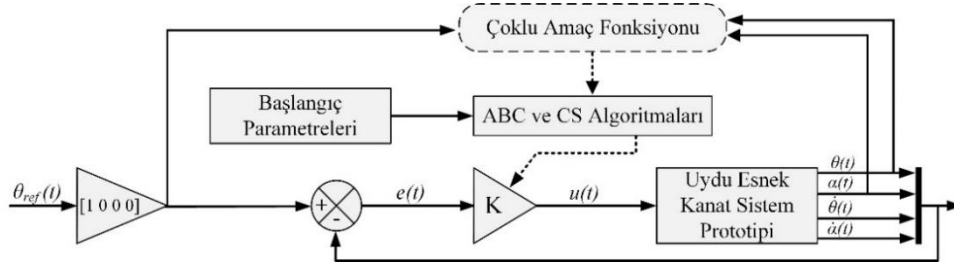
$$\ddot{\alpha} = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}}\ddot{\theta} + K_s \left( \frac{J_{link} + J_{eq}}{J_{link}J_{eq}} \right) \alpha - \frac{1}{J_{eq}}\tau \quad (2)$$

Tablo 1. Deney düzeneği parametreleri

Table 1. Experimental setup parameters

Sembol	Açıklama	Değer
$B_{eq}$	Dişli eşdeğer viskoz sönüm oranı	0.004 N.m.s/rad
$J_{link}$	Esnek robot kol atalet momenti	0.0038 kg.m <sup>2</sup>
$J_{eq}$	Büyük-Dişli eşdeğer atalet momenti	0.0026 kg.m <sup>2</sup>
$\eta_g$	Dişli kutusu verimi	0.9
$\eta_m$	Motor verimi	0.69
$R_m$	Motor armatür direnci	2.6 $\Omega$
$K_s$	Esnek kol için esneklik katsayısı	1.3522
$K_m$	Zıt emk sabiti	0.00767 V/(rad/s)
$K_t$	Motor tork sabiti	0.00767 N.m/A
$K_g$	Planet dişli kutusu oranı	14:5
$V_m$	Motor giriş voltajı	-
$L_1$	Esnek uzvun uzunluğu	0.419 m
$\omega_n$	Doğal frekans	20,4
$\zeta$	Sönüm oranı	0,07





Şekil 2. LQR kontrol parametreleri için blok diyagramı

Figure 2. Block diagram for LQR control parameters

## 2.2. Doğrusal Kuadratik Regülatör (LQR)

Doğrusal kuadratik regülatör (LQR) kontrol tekniği kapalı çevrim kontrol sistemlerinden birisidir. Birçok kullanım alanı olan bu yaklaşımın kararlı yapısı, bozuculardan etkilenme konusunda başarılı olması tercih edilmesinin sebeplerindedir[20].

Eş. 3 ile tanımlanan bir sistem için  $x$  durum vektörünü,  $u$  ise kontrol matrisini temsil etmektedir.  $A$ ,  $B$  ve  $C$  ise dinamik sistemin matrisleri olarak gösterilmektedir.

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx \quad (3)$$

İkinci dereceden maliyet fonksiyonu olan  $J$ , Eş. 4 ile gösterilmektedir. Denklemdaki  $Q$ , ve  $R$  simetrik ve pozitif ağırlık matrisleridir.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (e^T Q e + u^T R u) dt \quad (4)$$

Ağırlık matrisleri ( $Q$  ve  $R$ ) ikinci dereceden maliyet fonksiyonunun minimize edilmesinde kullanılmaktadır. Maliyet fonksiyonunun minimize edilmesiyle  $u$  hesaplanır.  $u = K(referans - x)$  şeklinde gösterilmektedir.  $K$ , kazanç vektörünü temsil eder Eş. 5 ile gösterilmektedir.

$$K = R^{-1} B^T P \quad (5)$$

LQR kazanç matrisinin hesaplanmasında pozitif tanımlı simetrik matris olan  $P$ 'ye ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için Eş. 6 ile gösterilen Ricatti denkleminin çözümü kullanılmaktadır.

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (6)$$

Ricatti denkleminin çözümü sonucu belirlenen  $P$  değeri sayesinde sistemin kazancı bulunarak denetleyici tasarlanmaktadır. Eşitlikte bulunan,  $Q$  ve  $R$  matrisleri tasarlanan LQR denetleyicinin performansını doğrudan etkileyen önemli parametrelerdir [20]. Ağırlık matrisleri Eş. 7 ile gösterilmektedir.

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_n \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

Ağırlık matrislerinin seçimi sistem cevabını ve kontrol performansını doğrudan etkilemektedir.

## 2.3. LQR Denetleyicinin Optimizasyonu

Geleneksel yöntemler ile yapılacak olan tasarımların oluşturduğu dezavantajların giderilmesi için ağırlık matrislerinin ( $Q$  ve  $R$ ) sürü tabanlı Yapay Arı Kolonisi (ABC) ve Güğuk Kuşu (CS) metasezgisel optimizasyon algoritmaları ile belirlenmesi hedeflenmektedir. Algoritmalar 10, 50 ve 100 popülasyon boyutu

değerinde ve 100 iterasyonda incelenmiştir. Ayrıca algoritmaların başlangıç parametreleri detaylı benzetim çalışmaları ile belirlenmiştir.

Tablo 2. LQR denetleyici ağırlık matrisleri alt ve üst sınırları

Table 2. LQR controller weight matrices lower and upper bounds

	Q1	Q2	Q3	Q4	R1
Alt Sınır	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Üst Sınır	2500	1000	10	10	10

Tablo 2 ile alt ve üst sınırları sunulan LQR denetleyicinin ağırlık matrislerinin ( $Q$  ve  $R$ ) matrislerinin optimizasyonu için amaç fonksiyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilecek optimizasyonun amacı esnek uzvun istenilen açılma referansa en hızlı ulaşırken sistemin hareketinden ve yapısından dolayı oluşacak artık titreşimlerin tamamen yok edilmesi veya en az seviyeye getirilmesidir. Sistemin zaman cevabından elde edilen tepe zamanı ( $t_p$ ), yükselme süresi ( $t_r$ ), yerleşme zamanı ( $t_s$ ), kararlı durum hatası ( $s_s$ ) ve maksimum aşım ( $s_p$ ) parametrelerini en aza indirmek için esnek kanat uç açısını ( $\alpha$ ) ve servo motor açısını ( $\theta$ ) için tarafından yeni bir çoklu amaç fonksiyonu tasarlanarak Eş. 8 ile gösterilmektedir. Önerilen amaç fonksiyonunun tasarımı literatürdeki ilgili [11,12,14] çalışmalar incelenerek sistemin kontrol yanıtlarını dikkate alan yeni bir yaklaşım kullanılmıştır.

$$J = J_\theta + J_\alpha$$

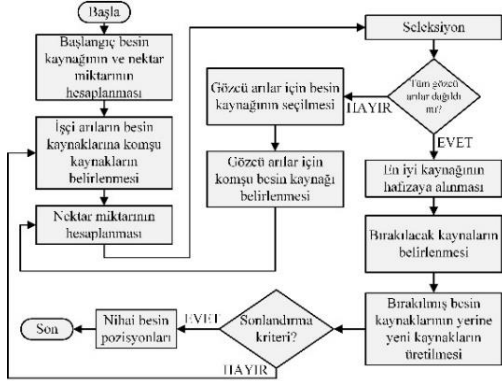
$$J_\theta = (20t_r(\theta)) + (10t_s(\theta)) + (10t_p(\theta)) + (0.1|\max s_p(\theta)|) + (4.4|\max s_s - ref|(\theta)) \quad (8)$$

$$J_\alpha = (0.1\text{norm}(\alpha)) + (4t_s(\alpha)) + (100t_p(\alpha)) + (0.8|\max s_p(\alpha)|) + (1500|\max s_s - ref|(\alpha))$$

## 2.4. Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony -ABC)

Yapay arı kolonisi, arıların doğadaki besin bulma davranışlarından esinlenerek karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için 2005 yılında Derviş Karaboğa tarafından ortaya atılan sürü tabanlı bir metasezgisel arama algoritmasıdır [21]. Algoritmada üç çeşit (işçi, kâşif ve gözcü) arı türünden oluşmaktadır. Birinci grup bilinen kaynaktan nektar taşıyan işçi arılardır. Bu arılar dans ederek diğer arılara nektarın bulunduğu yerin bilgisini bildirmektedir. İkinci arı çeşidi ise gözcü arılardır. İşçi arılar tarafından getirilen bilgiler sayesinde nektarın bulunduğu yere doğru yönelmektedirler. Koloninin yarısı işçi yarısı ise gözcü arılardan oluşmaktadır. İşçi ve gözcü arılar buldukları nektar tükendiği zaman birer kâşif arıya dönmekte ve üçüncü grubu oluşturmaktadır. Bu grup ise belli bir

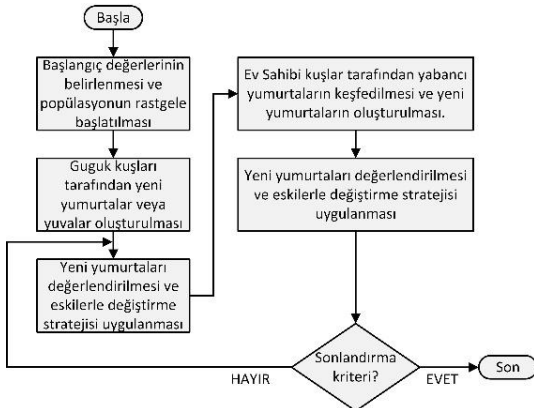
bilgi olmadan kovanın etrafında gelişigüzel dolaşarak nektar aramaktadırlar [21]. Yapay arı kolonisi algoritmasının algoritma akış şeması Şekil 3 ile sunulmaktadır.



Şekil 3. Yapay arı kolonisi (ABC) algoritma akış şeması  
Figure 3. Flowchart of the Artificial Bee Colony (ABC) algorithm

2.5. Guguk Kuşu Algoritması (Cuckoo Search-CS)

Guguk kuşu (CS) optimizasyon algoritması, Yang ve Deb tarafından, guguk kuşlarının davranışlarından esinlenerek, sürü zekasına dayanan verimli bir metasezgisel optimizasyon algoritması olarak geliştirilmiştir. Guguk kuşları, özel yaşam tarzları ve agresif üreme stratejilerinden esinlenilerek oluşturulmuştur [22]. Algoritmanın akış şeması Şekil 4 ile gösterilmektedir. Kendi yuvaları dışındaki başka canlıların yuvalarında yumurtlayabilen guguk kuşları yumurtladıkları yuvadaki yavru çıkma olasılığı yüksek yumurtaları yuvadan atabilirler. Ayrıca yuvanın sahibi de guguk kuşunun yumurtasını tanırsa yumurtayı atar veya o yuvayı terk etme davranışını göstermektedir. Fakat yuva sahibi yumurtaları tanıyamazsa guguk kuşunun yumurtalarına da kendi yumurtaları gibi üzerine oturmaktadır. Bu durum kuluçka parazitliği olarak tanımlanır ve algoritma bunun üzerine geliştirilmiştir [22].



Şekil 4. Guguk kuşu algoritması algoritma akış şeması  
Figure 4. Flowchart of the Cuckoo Search (CS) algorithm

3. Bulgular ve Tartışma

Makale kapsamında, sürü tabanlı CS ve ABC algoritmaları için üç farklı konfigürasyon belirlenmiştir. Bu konfigürasyonlar 10, 50 ve 100 popülasyon değerinde ayrı ayrı incelenmiş ve elde edilen sonuçlar tablo ve grafikler ile sunulmuştur. Guguk kuşu Algoritmasının yabancı yumurtaların keşif oranı (pa) ve adım boyutu (alfa) olan parametreleri sırasıyla (0.2-0.2), (0.5-1) ve (0.7-5) olarak seçilerek üç farklı konfigürasyon oluşturulmuştur. Benzer biçimde yapay arı kolonisi için modifikasyon oranı (mr) ve durdurma kriteri (A) parametreleri için sırasıyla (0,3-600),

(0.5-200) ve (0.8-400) olacak şekilde üç konfigürasyon belirlenmiştir. Tüm simülasyon sonuçları 100 iterasyonda elde edilmiştir. Optimizasyon başarılarını kıyaslamak için kullanılacak en düşük amaç fonksiyonu değeri (J), optimizasyon süreleri ve konfigürasyonların başlangıç parametreleri, her algoritma için ayrı ayrı gösterilmektedir.

Tablo 3. CS Algoritması için konfigürasyonlar

Table 3. Configurations for CS Algorithm

Konfig-1	Popülasyon	10	50	100
	Parametreler			
pa	0.2	0.2	0.2	0.2
alfa	0.2	0.2	0.2	0.2
J	38.333	36.3292	35.9657	
Süre(sn)	207.008	970.0443	1.9140e+03	
-----				
Konfig-2	pa	0.5	0.5	0.5
	alfa	1	1	1
	J	36.7852	36.3094	36.0858
	Süre(sn)	203.0523	974.8149	1.9253e+03
-----				
Konfig-3	pa	0.7	0.7	0.7
	alfa	5	5	5
	J	38.2188	36.1295	36.0953
	Süre(sn)	202.4303	968.0658	1.9327e+03

Tablo 4. ABC Algoritması için konfigürasyonlar

Table 4. Configurations for ABC algorithm

Konfig-1	Popülasyon	10	50	100
	Parametreler			
mr	0.3	0.3	0.3	0.3
A	600	600	600	600
J	38.7974	36.0367	36.0232	
Süre(sn)	200.134	956.024	1.8946e+03	
-----				
Konfig-2	mr	0.5	0.5	0.5
	A	200	200	200
	J	38.2586	36.491	35.9907
	Süre(sn)	198.7855	953.9476	1.8916e+03
-----				
Konfig-3	mr	0.8	0.8	0.8
	A	400	400	400
	J	38.5493	36.6087	35.8305
	Süre	199.6230	963.9631	1.9634e+03

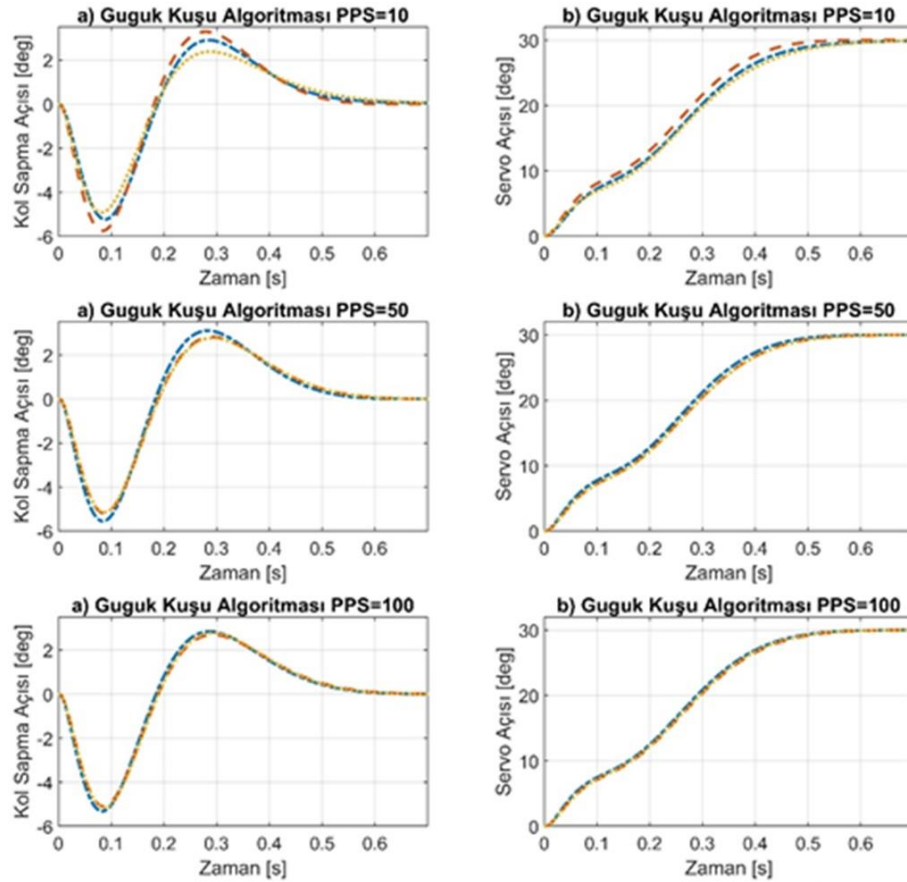
Tablo 3 ile gösterilen sonuçlar incelendiğinde her konfigürasyon için 100 popülasyon boyutu değerinde en düşük amaç fonksiyonu değeri elde edildiği görülmektedir. Bununla beraber işlem sürelerinin uzadığı sonucuna ulaşılmaktadır. Tüm sonuçlar incelendiğinde ise guguk kuşu algoritmasının en düşük amaç fonksiyonuna birinci konfigürasyonda ve 100 popülasyon boyutu değerinde ulaştığı gözlemlenmektedir. Popülasyon sayısı arttıkça konfigürasyonlardan bağımsız olarak daha düşük amaç fonksiyonu değerlerine ulaşılırken optimizasyon süreleri artmıştır.

Tablo 4 ile yapay arı kolonisi için elde edilen simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Optimizasyon sonuçları incelendiğinde Konfig-3 ile en düşük amaç fonksiyonu değerine ulaşılmaktadır. Bu değer makale kapsamında incelenen iki algoritma ve üçer konfigürasyon için en düşük değer olarak görülmektedir. Aynı zaman da en uzun hesaplanma süresine sahiptir.

Çalışmanın kapsamında elde edilen sonuçlar, birbirine yakın değerlere ulaşmaktadır. Bu durumda, önerilen amaç fonksiyonunun başarılı sonuçlar ürettiği gösterilmektedir. Genel olarak popülasyon büyüklüğü ve optimizasyon başarısı birbiriyle paralellik göstermektedir. Popülasyon büyüklüğü arttıkça, incelenen iki algoritmanın optimizasyon sonuçları da iyileştiği aynı zamanda hesaplama sürelerinin uzadığı görülmektedir. Tablo 3 ve Tablo 4 incelendiğinde guguk kuşu algoritması konfigürasyonlarının hesaplama süreleri aynı popülasyon boyutu değerindeki yapay arı kolonisi algoritması konfigürasyonlarından daha uzun olduğu görülmektedir.

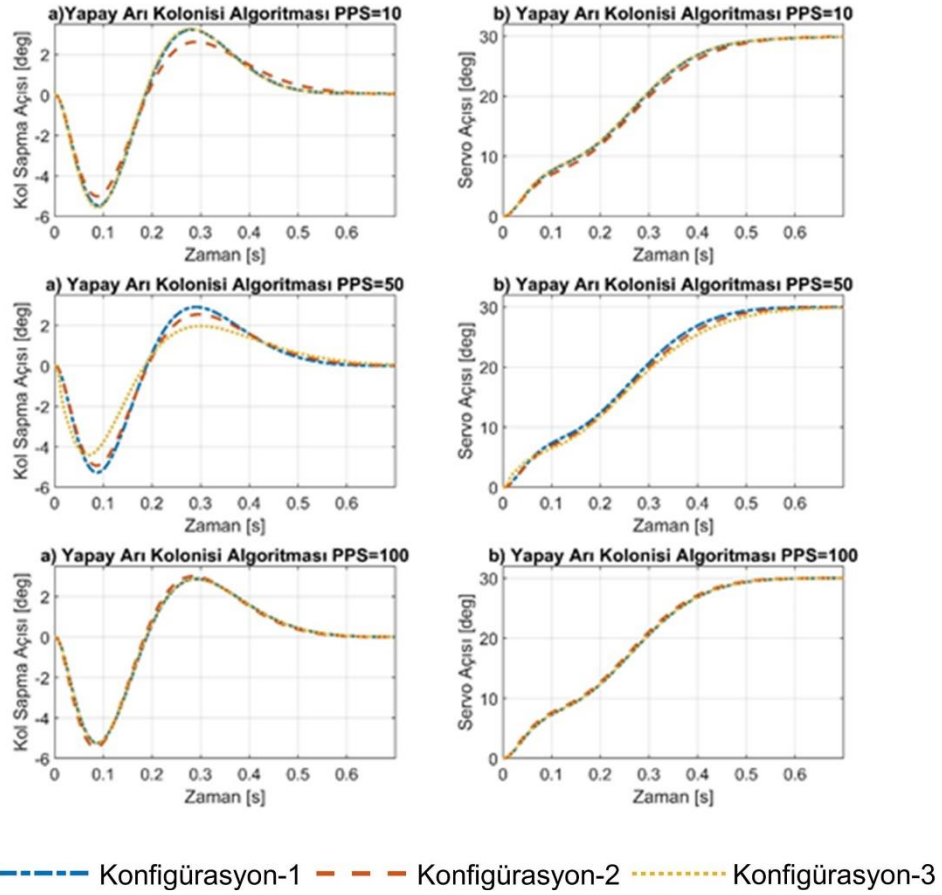
LQR ağırlık matrislerinin Guguk kuşu algoritması ile optimize edilerek ulaşılan sonuçların uydü esnek kanat prototipine uygulanması ile elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 5 ile sunulmaktadır. Konfigürasyonlar arasındaki farkları gösterebilmek için sunulan şekiller ile uydü kanadının uç sapma açısı ve servo açısı grafikleri her popülasyon boyutu değeri ayrı ayrı çizilmiştir. 10 popülasyon boyutu değerinde en yüksek uç sapma genliği konfigürasyon-2 olurken en düşük genlik konfigürasyon-3 tarafından ulaşılmıştır. Bununla beraber servo açısı en iyiden kötüye doğru sırasıyla konfigürasyon-2, konfigürasyon-1 ve konfigürasyon-3 şeklindedir. 50 popülasyon boyutu değeri incelendiğinde ise konfigürasyon-2 ve konfigürasyon-3 kanadının uç sapma genlikleri birbirine çok yakın çıkarken, konfigürasyon-1 en yüksek genliğe sahiptir. Servo açısının istenilen konuma en hızlı konfigürasyon-1 ile ulaştığı sonucuna ulaşılmaktadır. 100 popülasyon boyutu değerinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise tüm konfigürasyonlar için sonuçlar birbirine çok yakın çıktığı görülmektedir. Uç sapma genlikleri büyükten küçüğe konfigürasyon 1, 3 ve 2 şeklinde sıralanmaktadır. Ayrıca Konfigürasyon-1 en düşük amaç fonksiyonu değerine ulaşan algoritmadır.

Uydü esnek kanat prototipinin artık titreşim kontrolü için tasarlanan LQR denetleyicinin ağırlık matrislerinin ABC ile optimize edilmesi sonucunda elde edilen Kol sapma açısı ve Servo açısı simülasyon sonuçları Şekil 6 ile sunulmaktadır.



Şekil 5. CS algoritması simülasyon sonuçları

Figure 5. CS algorithm simulation results



Şekil 6. ABC algoritması simülasyon sonuçları

Figure 6. ABC algorithm simulation results

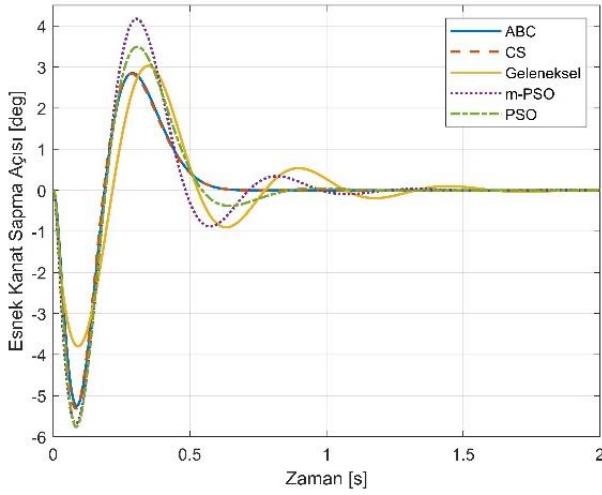
Şekil 6 ile gösterilen sonuçlar uydunun kanadının uç sapma açısı ve servo açısı olarak incelenmiş ve yüksek popülasyon büyüklüğü değerinde sonuçlar birbirine çok yakın çıkmıştır. Bu durum, önerilen amaç fonksiyonunun başarılı bir optimizasyon sonucu elde ettiğini göstermektedir. 10 popülasyon boyutu değerinde en düşük uç sapma açısı konfigürasyon-2, 50 popülasyon boyutu değerinde ise konfigürasyon-3 tarafından elde edilmiştir. 50 popülasyon boyutu değerinde konfigürasyon-1 en hızlı referans konuma ulaşan algoritmadır. Ayrıca konfigürasyonlar 50 ve 100 popülasyon boyutu değerinde referans konuma daha kısa sürede

ulaştıkları gözlemlenmektedir. Popülasyon boyutunun artması ile tüm konfigürasyonların uydusu esnek kanadı için simülasyon sonuçlarının daha iyiye gittiği sonucuna ulaşılmaktadır. Çalışma kapsamında incelenen yapay arı kolonisinin 100 popülasyon boyutu değerinde konfigürasyon-3 ile ve guguk kuşu algoritmasının 100 popülasyon boyutu değerinde konfigürasyon-1 ile en düşük amaç fonksiyonu değerine ulaştıkları görülmüştür. Elde edilen sonuçlar ile literatürde esnek robot kol ve LQR ile yapılan bazı çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 5. Karşılaştırılan kontrol yapılarının LQR denetleyici parametreleri

Table 5. LQR controller parameters of the compared control structures

	Q1	Q2	Q3	Q4	R1	K
ABC	190.74	810.93	0.255	0.795	4.6181	[6.4396 -8.1409 0.5209 0.1124]
CS	181.86	1000	1.040	2.236	2.60	[7.4002 -11.005 0.6847 0.1757]
İkizoğlu ve Gürışık (Geleneksel)	100	150	2	1	1	[10 -14.8249 1.6209 -0.7451]
Kumar ve Ohri (m-PSO)	145	4.1	1.05	7.1	1	[12.0416 -37.3209 1.6291 -0.9073]
Dharavath ve Ohri (PSO)	56.8	50.6	0.01	0.5	1	[7.5366 -8.0217 0.5113 -0.0109]



**Şekil 7.** Esnek Kanat uç açısı simülasyon sonuçları

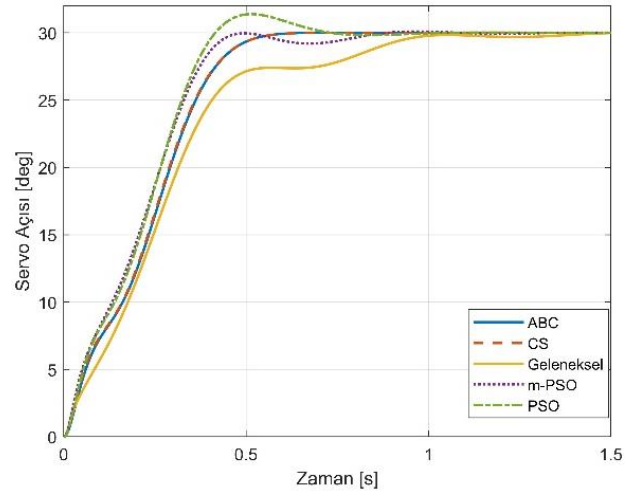
**Figure 7.** Simulation results of flexible wing tip deflection

Tablo 5 ile ABC, CS ve literatürdeki karşılaştırma için kullanılan karşılaştırılan çalışmaların  $Q$  ( $q_1, q_2, q_3, q_4$ ),  $R$  ağırlık ve kazanç ( $K$ ) matrisleri gösterilmektedir. ABC ve CS algoritmalarının ağırlık matrisleri çalışma kapsamındaki amaç fonksiyonu ve başlangıç değerleri ile elde edilen değerlerdir. İkizoğlu ve Gürışık tarafından 2018 yılında yapılan bir çalışma ile LQR kontrol ve yeni bir hibrit yöntem önerilmiştir [15]. Yapılan çalışmanın LQR ağırlık ve kazanç matrisleri kullanılmıştır. Dharavath ve Ohri 2021 yılında benzer bir deney düzeneğinin titreşim kontrolü için ITAE amaç fonksiyonu kullanarak yine sürü tabanlı bir metasezgisel optimizasyon algoritması olan parçacık sürü optimizasyon algoritması ile LQR parametrelerini belirlemişlerdir [16]. Kumar ve Ohri 2020 yılında yaptıkları çalışma ile benzer bir kontrol problemi için LQR kontrol yönteminin performansını arttırmak ve  $Q$  matrisinin belirlenmesi için modifiyeli bir parçacık sürü optimizasyon (m-PSO) kullanmışlardır [17]. Değerleri Tablo 4 ile sunulan bu çalışmaların karşılaştırılmış hali Şekil 7 ve Şekil 8 ile sunulmaktadır.

Esnek kanat yapısının sapma açısının sunulduğu Şekil 7 incelendiğinde ABC ve CS algoritmalarının birbirine çok yakın sonuçlar görülmektedir. Bununla beraber oluşan artık titreşimlerin daha kısa sürede giderildiği sonucuna ulaşılmaktadır. ITAE amaç fonksiyonu ve PSO algoritması ile yapılan kontrol çalışmasının artık titreşimlerin giderilmesi ise diğer çalışmalara göre daha uzun sürdüğü gözlemlenmektedir. Şekil 8 ile elde edilen kontrol yanıtlarının servo motor açısı için karşılaştırılması gösterilmektedir. Şekil 7 ile benzer biçimde çalışma kapsamında 100 popülasyon boyutu değerinde incelenen sürü tabanlı ABC ve CS algoritmaları birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum makale kapsamında yazılan yeni çok amaçlı fonksiyonun ve algoritmaların başarısını göstermektedir. Bu algoritmalar istenilen servo açısı referansına diğer çalışmalara göre hızlı ulaşmışlardır. Önerilen yaklaşım ile literatürdeki çalışmalardan daha iyi sonuç elde edildiği görülmektedir.

#### 4. Sonuçlar

Makale kapsamında yapılan çalışma ile kullanılan deney düzeneğinin esnek kanat istenilen açısal referansa en hızlı şekilde ulaşırken sistemin hareketinden dolayı oluşacak artık titreşimlerin bastırılması için LQR kontrol yapısı tasarlanmıştır.



**Şekil 8.** Servo açısı simülasyon sonuçları

**Figure 8.** Simulation results of servo angle

LQR kontrol yönteminin ağırlık matrisleri ABC ve CS algoritmaları ile belirlenmiştir. Optimizasyon için kontrol amacına uygun ve sistemin kontrol yanıtları dikkate alınarak yeni bir amaç fonksiyonu önerilmiştir. Önerilen yaklaşımın etkinliği, literatürde bulunan ağırlık matrislerinin PSO, m-PSO ve geleneksel olarak belirlendiği LQR denetleyiciler ile karşılaştırılarak önerilen yaklaşımın üstünlüğü gösterilmiştir.

Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıdaki şekliyle özetlenebilir;

- Elde edilen sonuçlar, tasarlanan yeni amaç fonksiyonunu ve kullanılan algoritmaların etkinliğini göstermektedir.
- CS ve ABC algoritması karşılaştırılan diğer algoritmalara göre uçuş kanadı açısında daha düşük genliğe sahiptir. Servo açılarına bakıldığında ise, bu algoritmaların istenilen açısal referansa daha hızlı ulaştıkları görülmektedir.
- Algoritmaların başlangıç parametrelerinin belirlenmesi optimizasyonun başarısını doğrudan etkilemektedir. Özellikle 10-50 popülasyon boyutu değerinde, konfigürasyonlar arasındaki farklar daha belirgindir.
- Algoritmaların popülasyon boyutu değeri arttıkça hesaplama süreleri artarken daha başarılı sonuçlar elde edilmektedir.
- CS ve ABC algoritmaların servo açılarının yerleşme zamanları arasında %0,0792 fark bulunmaktadır. CS algoritması daha başarılı olma süresi sunmaktadır.
- Servo açılarının yerleşme zamanları incelendiğinde, CS algoritması Geleneksel LQR arasında %82,03, m-PSO ile %49,80 ve PSO ile %26,14 fark bulunmaktadır.
- Esnek kanat yapısı için en iyi yerleşme zamanı performansını Guguk Kuşu algoritması vermektedir. Guguk Kuşu algoritması ile PSO arasında %37,56, m-PSO ile %61,87 ve geleneksel yöntemle göre ise %161,28 fark bulunmaktadır.

#### Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Yazar katkılarının beyanı

Ferhat KAYA: Metodoloji, yazılım, literatür taraması, yazım, simülasyon, kaynaklar.



Çağlar CONKER: Metodoloji, tasarım, yazılım, inceleme ve düzenleme, denetleme.

### Kaynaklar

- [1] Xie, L., Yu, X., Chen, L. 2022. Robust fuzzy sliding mode control and vibration suppression of free-floating flexible-link and flexible-joints space manipulator with external interference and uncertain parameter, *Robotica*, 40(4), s. 997-1019. doi:10.1017/S0263574721000977
- [2] Conker, C., A. Kilic, S. Mistikoglu, S. Kapucu, H. Yavuz. 2014. An enhanced control technique for the elimination of residual vibrations in flexible-joint manipulators, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 60(9), s. 592-599. doi:https://doi.org/10.5545/sv-jme.2014.1698.
- [3] Conker, C., H. Yavuz, H.H. Bilgic. 2016. A review of command shaping techniques for elimination of residual vibrations in flexible-joint manipulators. *Journal of Vibroengineering*, 18(5), s. 2947-2958. doi:https://doi.org/10.21595/jve.2016.16725.
- [4] Singhose, W.E. 2009. Command shaping for flexible systems: A review of the first 50 years, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 10(4), s. 153-168. doi:10.1007/s12541-009-0084-2
- [5] Kurode, S., Dixit, P. 2012. Output feedback control of flexible link manipulator using sliding modes. 2012 7th International Conference on Electrical and Computer Engineering, Dhaka, Bangladesh, 949-952. doi: 10.1109/ICECE.2012.6471708.
- [6] Bezilla, J., Takarics, B., Vanek, B., Guo, J. 2022. Parameter Uncertainty Analysis in Precise Pointing Control of Flexible Spacecraft, *IFAC-PapersOnLine*, 55(20), s. 241-246. Doi:https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.102.
- [7] Talebi, H.A., Khorasani, K., Patel, R.V. 1998. Neural network based control schemes for flexible-link manipulators: simulations and experiments, *Neural networks*, 11(7-8), s. 1357-1377. doi: 10.1016/s0893-6080(98)00038-0.
- [8] Pham, D. T. and M. Kalyoncu. 2009. Optimisation of a fuzzy logic controller for a flexible single-link robot arm using the Bees Algorithm, 2009 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics, Cardiff, UK, 2009, pp. 475-480, doi: 10.1109/INDIN.2009.5195850
- [9] Hu, O.I., Wang, Z., Gao, H. 2008. Sliding mode and shaped input vibration control of flexible systems, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 44(2), s. 503-519. doi: 10.1109/TAES.2008.4560203.
- [10] Liu, F.C., Liang, L.H., Gao, J.J. 2014. Fuzzy PID Control of Space Manipulator for Both Ground Alignment and Space Applications, *Int. J. Autom. Comput.* 11, s. 353-360. https://doi.org/10.1007/s11633-014-0800-y
- [11] Özkaya, S., Conker, Ç., Bilgiç, H.H. 2021. ESNEK ROBOT KOL SİSTEMİ İÇİN LQR DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN METASEZGİSEL ALGORİTMALAR KULLANILARAK BELİRLENMESİ, *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(3), s. 735-752. DOI: 10.36306/konjes.896087
- [12] Bilgiç, H.H., Şen, M.A., Yapıcı, A., Yavuz, H. Kalyoncu, M. 2021. Meta-Heuristic Tuning of the LQR Weighting Matrices Using Various Objective Functions on an Experimental Flexible Arm Under the Effects of Disturbance, *Arabian Journal For Science And Engineering*, Doi:10.1007/s13369-021-05428-7.
- [13] Solihin, M.I., Wahyudi, Legowo, A., Akmeliawati, R. 2010. Comparison of LQR and PSO-based state feedback controller for tracking control of a flexible link manipulator. 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering. 354-358.
- [14] Kaya, F., Conker, Ç. 2020. Sarkaç Tipi Tepe Vinç Sistemi İçin Genetik Algoritma ve Termal Değişim Optimizasyon Algoritmaları ile LQR Denetleyici Tasarımı ve Performans Karşılaştırması. V. International Scientific and Vocational Studies Congress – Engineering (BILMES EN 2020), 127-139.
- [15] İkizoğlu, S., Gürışık, O. 2018. LQR Based Optimal Control for Single-Joint Flexible Link Robot, 2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT), Istanbul, Turkey, 2018, s. 1-6. doi: 10.1109/CEIT.2018.8751937.
- [16] Dharavath, P.K., Ohri, J. 2021. Optimized Control Design of LQR for Flexible Joint Manipulator. In: Vadhera, S., Umre, B.S., Kalam, A. (eds) Latest Trends in Renewable Energy Technologies. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 760. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1186-5\_22
- [17] Kumar, N., Ohri, J. 2020. Novel m-PSO Optimized LQR Control Design for Flexible Link Manipulator: An Experimental Validation, *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 14(2), s. 81-92.
- [18] Damaren, C.J. 1995. Passivity analysis for flexible multilink space manipulators, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 18:2, s. 272-279. Doi: https://doi.org/10.2514/3.21380
- [19] Quanser Inc 2012 b "SRV02-Series Flexgag-Rotary Flexible link user manual"
- [20] Anderson, B.D., Moore, J.B. 2007. Optimal control: linear quadratic methods. Courier Corporation.
- [21] Karaboga, D., Basturk, B. 2007. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm, *Journal of Global Optimization*, 39(3), s. 459-471. Doi: https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x
- [22] Yang, X.S., Deb, S. 2008. Nature-inspired metaheuristic algorithms. Luniver Press, Bristol



# Kütleli Rotorlu İndüksiyon Motorlarında Oluşan Eddy Akımlarının Kollokasyon Yöntemi Kullanılarak Çözümü

## Solving Eddy Currents in Solid Rotor Induction Motors through the Collocation Method

Hüseyin Yıldız 

İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: huseyin.yildiz@iuc.edu.tr

### Öz

Elektrikli araç teknolojisinin hayatımıza girmesi ile birlikte farklı türde elektrik motorlarının gelişimi ve verimlilik hesaplamaları araştırmacılar tarafından ilgi görmektedir. Kalıcı mıknatısların üretim maliyetlerinin artması nedeni ile, yüksek hızlı çalışan sistemlerde kullanılmak üzere çeşitli indüksiyon motor tasarımları mevcuttur. Kütleli rotorlu indüksiyon motorları (KRİM) basit yapıları, üretim kolaylığı, yüksek hızda titreşimsiz çalışması gibi nedenlerden dolayı öne çıkan motor türlerindedir. KRİM yapılarının optimizasyon süreçlerinde analitik çözümlerin elde edilebilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, KRİM tasarımlarında, ağırlıklı kalanlar yöntemlerinden biri olan kollokasyon yönteminin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada Maxwell denklemleri farklı mertebede kollokasyon polinomları tarafından modellenerek analitik çözümler ile kıyaslanmıştır. Çalışmada, kollokasyon yönteminin elektromanyetik sistemlerin çözümü için kullanışlı olduğu, 12 ve üzeri kollokasyon noktası kullanılması durumunda kabul edilebilir ( $RMSE < 1e^{-5}$ ) sonuçların elde edilebileceği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kütleli rotorlu indüksiyon motoru, kollokasyon yöntemi, yaklaşık çözüm, girdap akımları

### Abstract

With the integration of electric vehicle technology into our daily lives, researchers have increasingly focused on the development of various electric motor types and efficiency calculations. Given the rising production costs of permanent magnets, researchers have explored alternative induction motor designs suitable for high-speed systems. Solid rotor induction motors (SRIM) stand out due to their simple structures, ease of production, and exceptional vibration-free operation at high speeds. It is crucial to derive analytical solutions for optimizing Solid Rotor Induction Motor (SRIM) structures. This study explores the viability of utilizing the collocation method, a type of weighted residuals approach, for the modeling of SRIM structures. Collocation polynomials of various orders were employed to model the Maxwell equations, and the results were compared with analytical solutions. The findings demonstrate that the collocation method effectively solves electromagnetic systems, and employing 12 or more collocation points yields results within acceptable limits, with an RMSE of less than  $1e^{-5}$ .

**Keywords:** Solid rotor induction motor, collocation method, approximate solution, eddy currents.

### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction

In the literature, electric motors exhibit diverse structures and characteristics aligned with their application areas. Permanent magnet synchronous motors (PMSM) offer high torque density, reliability, and system efficiency [4]. Induction motors remain one of the most prevalent types today. Solid rotor induction motors (SRIM) are favored in high-speed systems due to their ease of manufacture, high strength, and safety [6]. The literature presents various SRIM designs with differing rotor structures. One of the most common types features axially sliced conductive slots within the rotor body [7]. This axially slitted rotor structure facilitates the reduction of air losses and enhances electromagnetic performance [8]. The most commonly used SRIM type employs solid steel cylinder rotors [9]. Typically, these are constructed from low-carbon ferromagnetic steel, boasting high mechanical strength and heat capacity [10].

Computer-aided analysis of electric motors typically employs two main methods: numerical and analytical approaches [12, 13]. Numerical methods generally involve the creation of a geometric model of the system, followed by computational analysis within a computer environment [14, 15]. Owing to their ease of use and reliability, commercially available finite element analysis (FEA) software packages are often preferred over custom software development. Among these, ANSYS Maxwell, COMSOL, and Finite Element Method Magnetics (FEMM) are widely utilized for electromagnetic system analysis. The versatility in handling diverse geometries and the user-friendly interface contribute significantly to the preference for FEA programs. In essence, the computational domain is discretized into small elements, forming a linear solution mesh. Solving this discretized domain computationally often incurs high computational costs, necessitating high-capacity computers.

Solid rotor induction motor (SRIM) systems typically exhibit homogeneous rotor structures with uniform geometries. This characteristic facilitates analytical solutions for the governing electromagnetic interaction equations under specific assumptions. Several studies exploring these analytical computations exist within the literature [16-19]. Notably, solving the electromagnetic equations in cylindrical geometries commonly relies upon the symmetric solution of the Helmholtz equation. However, solutions obtained under this cylindrical symmetry assumption frequently include complex components of Bessel and Modified Bessel functions. Consequently, the torque and force components translate into highly intricate mathematical formulations. This complexity ultimately hinders the utilization of these equations for optimization and parametric design applications.

## Materials and Methods

Solving electromagnetic problems hinges on the solution of Maxwell's equations. This system simplifies for electromagnetic domains comprising linear, isotropic, and permeable conducting materials. Equation 2 expresses the magnitudes of the magnetic field (B) and electric field (E) in terms of the vector potential (A). The rotor is a solid conductor of radius  $r_1$  and is magnetic. The stator is assumed to generate a sinusoidal electric current across the cylinder surface at position  $r_0$ , with infinite magnetic permeability. Equation 2 employs exponential collocation functions. The rotating rotor region and the air gap between the rotor and the stator are considered as two different regions. Optimal collocation coefficients satisfying the boundary conditions in both regions are determined, ultimately yielding the solution.

## Results and Discussion

This study investigates whether the collocation method, one of the weighted residual methods, is suitable for the analytical modeling of solid-state-rotor induction motors. Initially, partial differential equations (Equation 8-9) and boundary conditions

(Equation 12-14) that need to be solved by decomposing Maxwell's equations were simplified. For the application of the collocation method, exponential functions (Equation 19) and a polynomial family (Equation 21) that satisfy the boundary conditions were defined. The results of the solutions, consisting of 4, 8, 12, and 16 collocation points, are presented in Figures 2 and 3. It was shown that the errors decreased as the number of collocation points increased, and precise solutions could be obtained when a sufficient number of collocation points were used.

An increase in the number of collocation points not only increases the order of the selected polynomial but also improves the function's behavior. Table 2 compares the magnetic vector potential obtained from the collocation method with the results of the analytical solution. For the solution with 12 collocation points and a slip value of , the corresponding MAE, MSE, and RMSE values are 0.00058, 3.30E-06, and 0.013, respectively. On the other hand, for the solution with 8 collocation points and a slip value of , the MAE, MSE, and RMSE values are found to be 0.00011, 3.16E-08, and 0.00235.

## Conclusion

There are some articles available in the literature that investigate the analytical solution of SRIM (Solid Rotor Induction Motor) designs, similar to different electric motors [17-19]. These studies typically involve single or double rotor layers. Few of them included the investigation of stator structures. This situation arises from the challenges encountered in solving the Maxwell equations. There are not enough solutions for more complex problems. It has been demonstrated that the proposed collocation method eliminates the problems encountered in solving the Maxwell equations. When a sufficient number of collocation points are used, approximate solutions that can be easily expressed using exponential or polynomial functions can be obtained.

## 1. Giriş

Son yıllarda elektrik makinelerinin veriminin artması ile birlikte elektrik motorlarının araç teknolojilerinde kullanımı yaygınlaşmıştır. Elektrikli kara araçları, drone ve elektrikli uçaklar, elektrikli denizaltı ve elektrikli gemi sistemleri günümüzde en çok çalışılan konular arasındadır [1-3].

Elektrik motorları, kullanım alanlarına göre farklı yapı ve özelliklere sahiptir. Kalıcı mıknatıslı senkron motorlar (KMSM) (Permanent Magnet Synchronous Machines PMSM) yüksek tork yoğunluğu, yüksek güvenilirlik ve yüksek sistem verimliliğine sahiptir [4]. Genellikle rotor içerisine farklı dizilimlerde yerleştirilen mıknatıslar kullanılır. Toprakten elde edilen kalıcı mıknatıs tedariginde yaşanan sorunlar nedeni ile üretim maliyetleri her geçen gün artmaktadır [5].

İndüksiyon motorları günümüzde yaygın olarak kullanılan bir diğer elektrik motoru türüdür. Üretim kolaylığı, yüksek dayanımı ve güvenli olması nedeni ile kütleli rotorlu indüksiyon motorları (KRIM) (Solid Rotor Induction Machine SRIM) yüksek hıza ihtiyaç duyan sistemlerde tercih edilir [6]. Literatürde farklı rotor yapısına sahip KRIM tasarımları mevcuttur. En yaygın olarak kullanılan tiplerinden biri, rotor gövdesinde aksel olarak dilimlenmiş iletken yapılarla sahip rotordur [7]. Aksel olarak dilimlenmiş rotor yapısı hava kayıplarının azalmasına yardımcı olur ve elektromanyetik performansının artmasını sağlar [8]. En yaygın olarak kullanılan KRIM türü ise yekpare çelik silindirik

rotorlu motorlardır [9]. Genellikle düşük karbonlu ferromanyetik çelikten yapılırlar, mekanik dayanımları ve ısı kapasiteleri yüksektir [10].

Yüksek hızlı uygulamalarda çalışacak elektrik motorlarının yüksek performans, düşük maliyet ve yüksek dayanıma sahip olması için elektromanyetik, mekanik ve termal etkileşimi dikkate alınarak tasarlanmalıdır [7,11].

Elektrik motorlarının bilgisayar destekli analizinde genellikle sayısal ve analitik olmak üzere iki yöntem kullanılır [12-13]. Sayısal yöntemler genel olarak sistemin geometrik modelinin oluşturularak bilgisayar ortamında hesaplamaların yapılmasına dayanır [14,15]. Kullanım kolaylığı ve güvenilir olmaları nedeni ile özgün yazılımlar geliştirmek yerine, genellikle ücretli sonlu elemanlar (SEA)(finite element analysis (FEA)) paket programları tercih edilir. Literatürde elektromanyetik sistemlerin analizi için ANSYS Maxwell, COMSOL ve Finite Element Method Magnetics (FEMM) programları yaygın olarak kullanılan programlardır. SEA programlarında çok çeşitli geometrilerin oluşturulabilmesi ve kullanıcı dostu arayüzü tercih edilme nedenlerinin başında gelir. Temel olarak hesaplama alanı küçük elemanlara bölünerek doğrusal bir çözüm ağı yaratılır. Bu alanın bilgisayar ortamında çözümü genellikle hesaplama maliyetinin yüksek olmasına neden olur ve yüksek kapsaiteli bilgisayarlar gerektirir. Elektromanyetik yapıyı yöneten denklemlerin çözülmesi ile, elde edilen denklemlerin yapısal ve

ısı incelemler için farklı program altyapılarına aktarılarak yeni çözümler oluşturulmasına ihtiyaç duyulur.

KRİM sistemleri genellikle düzgün geometriye sahip homojen rotor yapılarından oluşur. Bu durum elektromanyetik etkileşimi yöneten denklemlerin belli kabuller altında analitik çözümünün yapılabilmesine olanak tanır. Guo vd. silindirik geometriye sahip bir KRİM geometrisinin devre parametrelerini elde etmek için analitik bir yöntem önermiştir. Çalışmada rotor üzerinde oluşan eddy akımlarını, rotor direnci ve karşılıklı endüktans katsayısını analitik olarak veren formüller türetilmiştir [16]. Papini vd. indüksiyon motorlarında oluşan eddy akımlarını analitik olarak elde etmiş, analitik çözümleri kullanarak girdap akımlardan kaynaklanan sıcaklık değişimini bir boyutlu SEA yöntemini kullanarak modellemiştir [17]. Ergene ve Ertuğrul iki katmanlı rotor yapısına sahip bir KRİM modelini ve stator geometrisini içeren elektromanyetik çözümleri analitik olarak elde etmiş ve SEA programı sonuçları ile kıyaslamıştır [18]. Chen vd. çok fazlı kafes tipi indüksiyon motorlarında, stator üzerinde oluşan manyetik motor kuvvetlerini (MMK) analitik olarak incelemiştir. Rotor geometrisini dört farklı alan olarak ele almış, her bir bölgede oluşan MMK kuvvetlerinin, uzamsal harmonik çözümler olarak elde edilebileceğini göstermiştir [19].

Elektromanyetik denklemlerin silindirik geometride çözümü genellikle Helmholtz denkleminin simetrik çözümüne dayanır [19]. Silindirik simetri kabulü altında elde edilen çözümler genellikle Bessel ve Modifiye Bessel fonksiyonlarının karmaşık bileşenlerini içermektedir. Bu nedenle tork ve kuvvet bileşenleri oldukça karmaşık matematiksel formüllere dönüşmektedir. Bu durum elde edilen denklemlerin optimizasyonu ve parametrik tasarımlarda kullanımını zorlaştırmaktadır.

Çalışmada, kollokasyon yönteminin temel yapısı açıklanmış, KRİM yapıları için kollokasyon yöntemi kullanılarak çözüm elde edilmiştir. Elde edilen çözümler literatürde yer alan analitik formüller ile kıyaslanarak geçerliliği gösterilmiştir. Bir problemde analitik çözüm yapılabiliyor ise genellikle sayısal yöntemler ile çözüm yapılmasına gereksinim duyulmaz. Günümüzde ilgilenilen mühendislik problemlerinin büyük bir çoğunluğunda analitik çözüme ulaşılamaz. Kollokasyon yöntemi, analitik çözümü yapılamayan bu sistemlerin çözümü için hızlı ve kullanışlı bir çözüm yöntemidir. Çalışma, elektromanyetik sistemlerin bilgisayar destekli analizi için kollokasyon yönteminin kullanımını açıklamakta olup, KRİM modelinde yeterli kollokasyon noktası alındığında, analitik çözüme yeterince yakın sonuçlar alınabileceğini göstermiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Doğrusal, izotropik geçirgen ve iletken malzemelerden oluşan elektromanyetik sistemler için Maxwell denklemlerinin diferansiyel formu Eşitlik (1) ile verilmiştir [20].

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu \mathbf{J} + \mu \dot{\epsilon} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

Burada,  $\mu$  ve  $\dot{\epsilon}$ , ortamın manyetik geçirgenlik sabiti ve dielektrik geçirgenlik sabiti,  $\rho$  ve  $\mathbf{J}$  ise serbest elektrik yük yoğunluğu ve akım yoğunluğudur. Akım yoğunluğu terimi dışarıdan uygulanan akımları ve elektrik iletkenliğinden oluşan akımları içermektedir. Elektrik ve manyetik alanlar  $\mathbf{E}$  ve  $\mathbf{B}$  skaler ve vektör potansiyeli  $\phi$  ve  $\mathbf{A}$  cinsinden ifade edilebilir [21].

$$\nabla^2 \phi = 0$$

Böylece Eşitlik (1) otomatik olarak sadeleşir. Elektrik alan ve manyetik alan ifadeleri  $\mathbf{A}$  vektörü türünden aşağıda verilmiştir [22].

$$\mathbf{E} = -i\omega \mathbf{A}$$

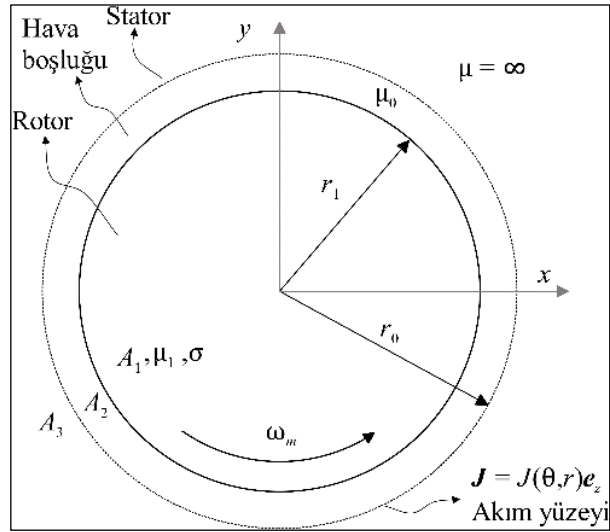
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu \dot{\epsilon} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu \mathbf{J} \quad (2)$$

Eşitlik (2) iletken, homojen ve izotropik ortamlar için geçerli olup, sistemin genel elektromanyetik davranışını veren diferansiyel denklemdir.

### 2.1. Elektrik Model

Birçok çalışmada KRİM için aşağıda verilen basitleştirilmiş model kullanılır (Şekil 1) [16,17]. Rotor,  $r_1$  yarıçapına sahip bir silindirden oluşur. Stator,  $r_0$  ( $r_0 > r_1$ ) yarıçapına sahip olup, manyetik geçirgenliği sonsuz kabul edilir. Akım eksene doğrultuda bir yüzey boyunca akmaktadır. Motor eksene uzunluğu  $L$  olarak kabul edilir ve kenarlarda oluşan uç etkileri ihmal edilir ( $r_1/L \ll 1$ ).  $\mu_0$  ve  $\mu_1$  sırası ile havanın ve rotorun manyetik geçirgenliği,  $\sigma$  rotor malzemesinin elektrik iletkenliğidir.



Şekil 1. Problem geometrisi

Figure 1. Problem geometry

Stator akımının açısal frekansı  $\omega$ , rotor üzerinde oluşan akımın açısal frekansı  $s\omega$  ve  $s < 1$  kayma (slip) olarak tanımlanır. Bu durumda mekanik açısal hız ( $\omega_m$ ),

$$\omega_m = \omega_s - \omega_r = (1-s)\omega \quad (3)$$

$p$  kutup sayısı (pole-pairs) olmak üzere yeniden tanımlanır.

$$\omega_m = (1-s) \frac{\omega}{p} \quad (4)$$

İki eş merkezli silindirik koordinat sistemi tanımlanır:  $(r, \theta, z)$  ve  $(r, \theta', z)$ .  $\theta$  sabit ve stator üzerinde (stator frame) yer alan eksene

göre açısal dönmeyi,  $\theta'$  rotor üzerindedir ve dönen eksen takımına göre dönmeyi temsil eder. Bu durumda,

$$\theta = \theta' + \omega_m t \quad (5)$$

Eşitlik (4) kullanılarak,

$$\omega t - p\theta = s\omega t - p\theta' \quad (6)$$

Akım yoğunluğu ( $\mathbf{J}$ ), manyetik vektör potansiyeli ( $\mathbf{A}$ ) ve elektrik alan ( $\mathbf{E}$ ) yalnızca  $z$  doğrultusunda oluşur. Manyetik alan ( $\mathbf{B}$ )  $r$  ve  $\theta$  bileşenlerinden oluşur.

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= J(\theta, t)\mathbf{e}_z \\ \mathbf{A} &= A(r, \theta, t)\mathbf{e}_z \\ \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \end{aligned} \quad (7)$$

Deplasman akımları ihmal edildiğinde, Eşitlik (2) yayılım vektörüne dönüşür.

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (\text{rotorda}) \quad (8)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A} = 0 \quad (\text{Hava boşluğunda})$$

Sabit koordinat eksenine göre;

$$\frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial \theta^2} = \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (9)$$

Stator yüzey akımı kompleks uzayda tanımlanır (Eşitlik 10).

$$\begin{aligned} J &= J_m \operatorname{Re}\{e^{j(\omega t - p\theta)}\} \\ J_m &= \frac{\sqrt{2}mK_{dp}I_p N}{\pi r_0} \end{aligned} \quad (10)$$

Burada,  $m$  faz sayısı,  $K_{dp}$  stator sargı faktörü,  $N$  bir fazda yer alan sargı sayısı,  $I$  faz akımının rms değeridir [16,17]. Eşitlik (9)'ün çözümünde değişkenlerine ayrıştırma yöntemi kullanılır. Bu durumda,

$$A(r, \theta, t) = \operatorname{Re}\{a(r)e^{j(\omega t - p\theta)}\}$$

Dönen rotor eksenini için Eşitlik (6) kullanılır ise,

$$A(r, \theta', t) = \operatorname{Re}\{a(r)e^{j(s\omega t - p\theta')}\}$$

Çözüm iki farklı alan üzerinde ayrıştırılarak elde edilir.

$$0 < r < r_1 \rightarrow A^1(r, \theta, t) = \operatorname{Re}\{a^{(1)}(r)e^{j(\omega t - p\theta)}\}$$

$$r_1 < r < r_0 \rightarrow A^2(r, \theta, t) = \operatorname{Re}\{a^{(2)}(r)e^{j(\omega t - p\theta)}\}$$

Böylece Eşitlik (9) basitleşir.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 a^{(1)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{da^{(1)}}{dr} - \left( \frac{p^2}{r^2} + j\omega\mu\sigma \right) a^{(1)} &= 0 \\ \frac{d^2 a^{(2)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{da^{(2)}}{dr} - \frac{p^2}{r^2} a^{(2)} &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

## 2.2. Elektrik model

Eşitlik (11)'in çözümü için dört temel sınır şartına ihtiyaç vardır.

Rotor ve stator ara kesitinde ( $r = r_1$ ) ekstenel doğrultuda elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri sürekli olmalıdır.

$$\frac{1}{\mu_1} \frac{da^{(1)}}{dr} = \frac{1}{\mu_0} \frac{da^{(2)}}{dr} \quad (12)$$

$$a^{(1)} = a^{(2)} \quad (13)$$

Stator akım yüzeyinde manyetik akı yüzey akımlarına eşit olmalıdır.

$$\frac{1}{\mu_0} \frac{da^{(2)}}{dr} = -J_m \quad (14)$$

Ayrıca, rotor ve stator yapısı silindirik simetri kabulü altında çözüldüğünden rotor iç bölgesinde ( $r = 0$ ) A sonlu olacak şekilde katsayılar seçilmelidir.

## 2.3. Kollokasyon Yöntemi

Mühendislik alanında karşılaşılan problemlerin analitik çözüme ulaşmak genellikle çok zor veya mümkün değildir. Bu gibi durumlarda genellikle bazı kabuller yapılarak analitik çözümü elde edilebilen problemlere indirgenir. Ancak analitik çözümler genellikle seri çözümlerdir ve karmaşık ifadelerden oluşur. Bazı durumlarda problemi temsil eden yaklaşık çözümler elde edilebilir. Kollokasyon yöntemi çeşitli mühendislik problemlerinin çözümü için kullanılan bir yöntemdir. Kısmi ve adi diferansiyel denklemlerin çözümünde, integro diferansiyel denklemlerin çözümünde ve sayısal verilerin yorumlanmasında kullanılmaktadır [23-25]. Durak çalışmasında adi ve kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde kollokasyon yönteminin nasıl uygulanacağını açıklamıştır [23]. Araştırmacılar, genelleştirilmiş eşit genişlikli dalga denklemini farklı kollokasyon yöntemlerini kullanarak sayısal çözmüştür [26,27]. Karakoç vd. kollokasyon temelli sonlu elemanlar yöntemini kullanarak Sawada-Kotera (S-K) denkleminin sayısal çözümlerini temsil eden bir matematiksel model incelenmiştir [28]. Ak ve Karakoç değiştirilmiş Kawahara denkleminin septik B-spline kollokasyon yöntemi ile sayısal çözümünü elde etmiş, Von-Neumann kararlılık analizi uygulayarak yöntemin koşulsuz olarak kararlı olduğu göstermiştir [29].

Genel formda bir diferansiyel denklem Eşitlik (15) ve Eşitlik (16) formunda tanımlanabilir.

$$\begin{aligned} y(0) &= y_0 \\ y(x_i) &= y_i \\ y(L) &= y_n \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} L(y) &= f(r) \\ \hat{y}(r) &= v(r) + \sum_1^n u_i(r) \end{aligned} \quad (16)$$

Burada,  $L$ ; diferansiyel operatör,  $f(r)$ ; homojenliği bozan terim,  $y$ ; diferansiyel denklemin çözüm fonksiyonu,  $\hat{y}$ ; yaklaşık çözüm,  $y_0$  ve  $y_n$  sınır şartları,  $y_i$ ;  $I$  noktasında fonksiyonun değeri,  $v$ ; problemin sınır şartlarını sağlayan keyfi bir fonksiyon,  $u_i$ ; diferansiyel denkleme sağlamak üzere önerilen polinom ailesidir.  $R(r_i)$  kalan (residual) olarak tanımlanır ve Eşitlik (17) ile hesaplanır.  $u_i$  polinom ailesi keyfi olarak seçildiğinden üstel, trigonometrik veya polinom formunda olabilir. Polinom ailesi ne



olursa olsun kalan  $R(r_i)$  önerilen polinom ailesinin katsayılarını içeren bir matris olarak karşımıza çıkar ve çözümünü halinde yaklaşık çözüm elde edilir.

$$R(r_i) = f(r_i) - L[\hat{y}(r_i)] = 0 \tag{17}$$

Eşitlik (18) dikkate alındığında,  $a^{(1)}$  ve  $a^{(2)}$  fonksiyonları için  $\hat{a}^{(1)}$  ve  $\hat{a}^{(2)}$  olmak üzere iki fonksiyonun yaklaşık çözümü elde edilmelidir.

$$\begin{aligned} \hat{a}^{(1)}(r) &= \hat{v}^{(1)}(r) + \sum_1^n u_i^{(1)}(r) \\ \hat{a}^{(2)}(r) &= \hat{v}^{(2)}(r) + \sum_1^n u_i^{(2)}(r) \end{aligned} \tag{18}$$

$\hat{v}^{(1)}$  ve  $\hat{v}^{(2)}$  fonksiyonları sınır şartlarını sağlamak üzere Eşitlik (19)'da verildiği formda seçilir.

$$\begin{aligned} \hat{v}^{(1)}(r) &= a_1 r_1^p + a_2 r_1^{-p} \\ \hat{v}^{(2)}(r) &= b_1 r^p + b_2 r^{-p} \end{aligned} \tag{19}$$

Eşitlik (12-14) ile verilen sınır şartlar dikkate alınır ise  $a_2 = 0$  ve Eşitlik (20) elde edilir. Elde edilen denklemlerin çözümü  $a_1, b_1, b_2$  katsayılarını verir.

$$\begin{aligned} a_1 r_1^p - b_1 r_1^p + b_2 r_1^{-p} &= 0 \\ \frac{n}{\mu_1} a_1 r_1^{p-1} - \frac{n}{\mu_0} (b_1 r_1^p - b_2 r_1^{-p-1}) &= 0 \\ \frac{n}{\mu_0} (b_1 r_1^p - b_2 r_1^{-p-1}) &= -J_m \end{aligned} \tag{20}$$

Eşitlik (19) ve Eşitlik (11) göz önüne alındığında  $\hat{v}^{(2)}$ 'nin verilen kısmi diferansiyel denklemini sağladığı görülür. Bu durumda yeni bir polinom önermeye gerek kalmaz. Ancak  $\hat{v}^{(1)}$  fonksiyonu Eşitlik (11a) ile verilen adi diferansiyel denklemini (ADD) sağlamaz. Bu nedenle ADD nin çözümünü elde etmek üzere  $u_i^{(1)}$  çözüm ailesi Eşitlik (21) ile verildiği üzere polinom olarak seçilebilir.

$$\begin{aligned} u^{(i)}(r) &= \sum_{i=1}^n c_i r^{i-1} \\ u_i^{(1)} &= c_i r^{i-1} \end{aligned} \tag{21}$$

Burada n bir tamsayıdır ve çözümün mertebesini ifade etmektedir.  $f(r_i) = 0$  olmak üzere;

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n c_i \frac{d^2(r^{i-1})}{dr^2} + \frac{1}{r} \sum_{i=1}^n c_i \frac{d(r^{i-1})}{dr} \frac{du^1}{dr} \\ - \left( \frac{p^2}{r^2} + j\omega\mu\sigma \right) \sum_{i=1}^n c_i r^{i-1} = -j\omega\mu\sigma(a_1 r^p) \end{aligned} \tag{22}$$

Eşitlik (22)'nin farklı kollokasyon noktaları için çözümü ile  $c_i$  katsayıları elde edilir. Eşitlik (18a) ve elde edilen katsayılar kullanılarak probleme ait yaklaşık çözümler elde edilir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Tablo 1 ile örnek bir Kırım parametreleri verilmiştir. Eşitlik (20) fiziksel büyüklükler dikkate alınarak çözülür ise  $a_1 = -26.9476$ ,

$b_1 = -13.4918$  ve  $b_2 = -154.9153$  elde edilir. Elde edilen sonuçlar literatürde yer alan analitik çözümler ile kıyaslanarak geçerliliği test edilecektir. Analitik çözüm yöntemi ve formülasyonu hakkında daha detaylı bilgi için için [18] ve [19] numaralı referanslar incelenebilir.

**Tablo 1.** Parametreler.

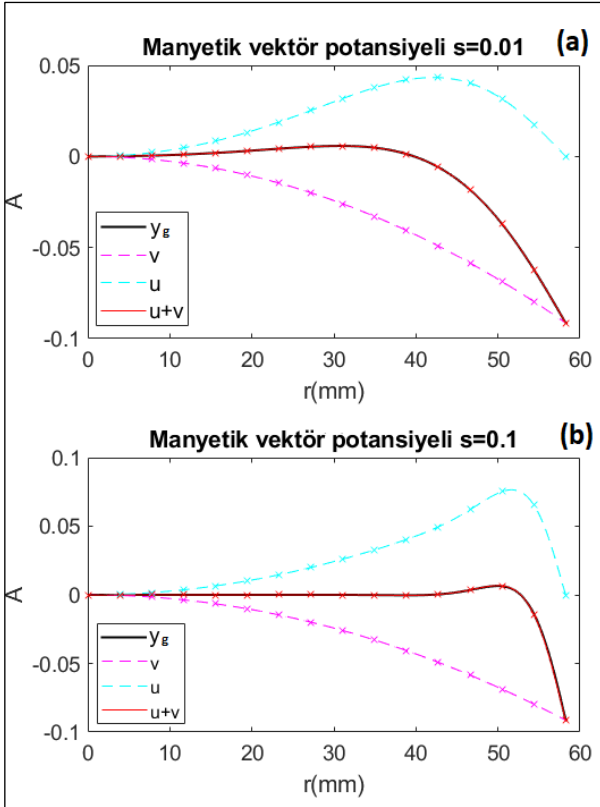
**Table 1.** Parameters.

Parametre	Değer	Açıklama
$m$	2	Faz sayısı
$K_{dp}$	1.0	Sargı faktörü
$I_p$ (A)	8	Faz akımı (rms)
$N$	100	Seri bağlı sarım sayısı
$r_0$ (mm)	58.5	Stator iç çapı
$r_1$ (mm)	58.3	Rotor dış yarıçapı
$P$	2	Kutup sayısı
$\mu_0$	$4\pi 10^{-7}$	Havanın manyetik geçirgenliği
$\mu_1$	$750 \mu_0$	Rotor manyetik geçirgenliği
$\sigma$ (S/m)	$5.55 \times 10^{-6}$	Rotor iletkenlik katsayısı

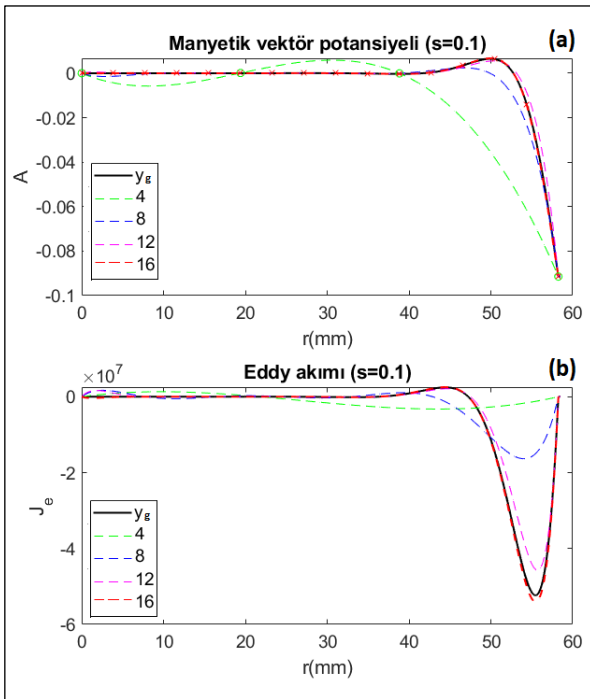
Şekil 2'de  $s=0.01$  ve  $s=0.1$  kayma değerine sahip Kırım nin 14 kollokasyon noktası için analitik çözüm ve yaklaşık çözüm birlikte verilmiştir. Şekilde görüleceği üzere her iki çözümde de,  $v(r)$  fonksiyonu analitik çözüm ile problem sınır şartlarını sağlayacak şekilde uyum sağlamaktadır.  $u(r)$  fonksiyonu ise sınırları homojen olarak seçilmiş olup, problemin çözüm alanında fonksiyonu gerçek çözüme yaklaştıracak şekilde değer almaktadır. İki fonksiyonun toplamı ( $\hat{y}(r) = v(r) + u(r)$ ) gerçek fonksiyon değerlerini sağlamaktadır.

Şekil 3a ve Şekil 3b ile  $s=0.1$  kayma değeri için farklı kollokasyon noktalarında manyetik vektör potansiyeli  $A$  ve eddy akımları  $J_e$ 'nin yarıçap doğrultusunda değişimi analitik çözüm ile birlikte gösterilmektedir ( $J_e = \sigma E$ ). Yaklaşık çözümün doğruluğu, kollokasyon nokta sayısı ile doğru orantılıdır. Her iki büyüklük için de kollokasyon nokta sayısı arttıkça yaklaşık çözüm analitik çözüme yaklaşmaktadır.  $n > 8$  için hata  $10^{-3}$ 'ten daha küçüktür.  $n=12$  için elde edilen yaklaşık çözüm gerçek çözümü çok iyi temsil etmektedir.

Ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error MAE), Ortalama kare hata (Mean Square Error MSE) ve Ortalama kare hatanın karekökü (Root Mean Square Error RMSE) iki serinin benzerlik oranını elde etmek ve seri benzerliğinin bir ölçüsü olarak kullanılan en yaygın parametrelerdir [30]. Burada gerçek (analitik) çözüm  $y_n$ , yaklaşık çözüm  $\hat{y}_n$  ve  $D$  örnek sayısı olmak üzere Eşitlik (23-25) ile hesaplanır.  $s = 0.1$  ve  $s = 0.01$  değerleri için farklı kollokasyon noktalarında hata değerleri hesaplanarak Tablo 2 ile verilmiştir.



**Şekil 2.** 0.01 ve 0.1 kayma değerleri için kollokasyon örneği  
**Figure 2.** Collocation example for 0.01 and 0.1 slip values



**Şekil 3.** Farklı kollokasyon nokta sayılarında yakınsama. Farklı kollokasyon noktalarında  $A$  (a). Farklı kollokasyon noktalarında  $J$  (b).

**Figure 3.** Convergence at different numbers of collocation points.  $A$  at different collocation points (a).  $J$  at different collocation points (b).

$$MAE = \frac{1}{D} \sum_{n=1}^D |y_n - \bar{y}_n| \quad (23)$$

$$MSE = \frac{1}{D} \sum_{n=1}^D (y_n - \bar{y}_n)^2 \quad (24)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{n=1}^D (y_n - \bar{y}_n)^2} \quad (25)$$

**Tablo 2.** Vektör potansiyeli için hata analizi tablosu.

**Table 2.** Error analysis table for vector potential.

$s$	$n$	$MAE$	$MSE$	$RMSE$
0.1	4	0.00899	0.00027	0.2012
	8	0.00115	7.65E-06	0.0257
	12	0.00058	3.30E-06	0.013
	16	7.24e-05	5.42E-08	0.0016
0.01	4	0.0029	1.76E-05	0.0644
	8	0.00011	3.16E-08	0.00235
	12	4.29e-07	5.80E-13	9.60E-06
	16	5.03e-10	8.38E-19	1.13E-08

Tablo 2’de görüldüğü üzere kayma arttıkça rotor dış çapı üzerinde manyetik etkiler biriktiğinden hata değerleri  $s$  ile doğru orantılıdır. 12 ve 16 kollokasyon noktasına sahip çözümlerin hata değerleri oldukça düşüktür.

Şekil 4 ile  $r$  ve  $\theta$  doğrultularında girdap akımlarının  $s = 0.01$  ve  $s = 0.1$  değerleri için değişimi gösterilmiştir. Görüldüğü üzere kayma değeri büyüdükçe eddy akımlarının derinliği düşmekte ve rotor cidarlarına yığılmaktadır.

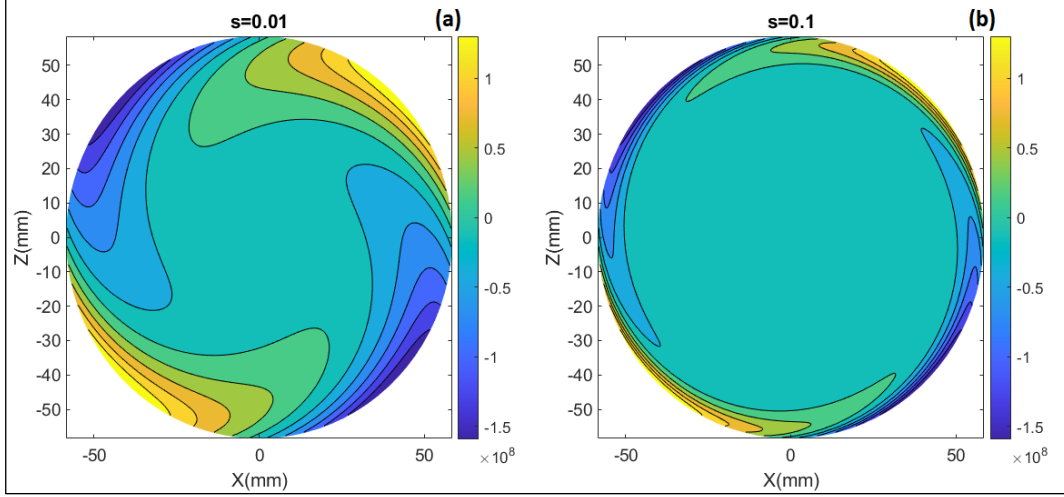
#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada ağırlıklı kalanlar yöntemlerinden kollokasyon yönteminin, kütleli rotorlu indüksiyon motorlarının analitik modellenmesi için uygun olup olmadığı araştırılmıştır. Öncelikli olarak Maxwell denklemlerinin ayrıştırılarak çözülmesi gereken kısmi diferansiyel denklemler (Eşitlik 8-9) ve sınır şartları (Eşitlik 12-14) elde edilerek sadeleştirilmiştir.

Kollokasyon yönteminin uygulanması için sınır şartlarını sağlayan üstel fonksiyonlar (Eşitlik 19) ve polinom ailesi (Eşitlik 21) tanımlanmıştır. 4, 8, 12 ve 16 kollokasyon noktasından oluşan çözümlerin sonuçları Şekil 2 ve Şekil 3 ile verilmiştir. Kollokasyon nokta sayısı arttığında hataların düştüğü, yeterli sayıda kollokasyon noktası alınması durumunda hassas çözümlerin elde edilebileceği görülmüştür. Kollokasyon nokta sayısındaki artış seçilen polinomun mertebesini arttırdığı gibi, fonksiyon davranışını da düzeltmektedir. Tablo 2’de kollokasyon yöntemi sonucu elde edilen manyetik vektör potansiyeli ile analitik çözüm sonuçları kıyaslanmıştır.  $s = 0.1$  kayma değerinde 12 kollokasyon noktasına sahip çözüme ait MAE, MSE ve RMSE değerleri sırası ile 0.00058, 3.30E-06 ve 0.013’dir.  $s = 0.01$  kayma değerinde 8 kollokasyon noktasına sahip çözüme ait MAE, MSE ve RMSE değerleri sırası ile 0.00011, 3.16E-08 ve 0.00235 olarak bulunmuştur. Kayma değeri düştükçe stator akımları ile rotor üzerinde oluşan eddy akımları arasında ki senkronizasyon artar. Bu nedenle kayma büyüdükçe çözüm zorlaşır.

Literatürde farklı elektrik motorlarında olduğu gibi KRİM tasarımlarının analitik çözümünü araştıran makaleler mevcuttur [17-19]. Çalışmalar genellikle bir veya iki rotor katmanını, çok azı ise stator yapısını da içerir. Bu durum Maxwell denklemlerinin çözümünde karşılaşılan zorluklardan kaynaklanmaktadır. Daha karmaşık problemler için çözümler sınırlıdır.

Önerilen kollokasyon yönteminin Maxwell denklemlerinin çözümünde karşılaşılan problemleri ortadan kaldırdığı, yeterli kollokasyon noktası alınır ise kolaylıkla üstel veya polinomal fonksiyonlar ile ifade edilebilecek yaklaşık analitik çözümler bulunabileceğini gösterilmiştir.



Şekil 4. Girdap akımlarının düzlemsel değişimi

Figure 4. Planar variation of eddy currents

#### Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Teşekkür

Makalenin hazırlanması sürecinde maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen Prof. Dr. Erol Uzal'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

#### Kaynaklar

- [1] Guo, Y., Wang, D., Liu, D., Wu, X., & Chen, J. 2011. Magnetic circuit calculation of non-salient pole synchronous generator based on distributed magnetic circuit method. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, 20-23 August, Beijing, China, 1-6. DOI:10.1109/ICEMS19346.2011
- [2] Chen, H., Zhang, J., Zhao, J., Qu, S. and Zhou, Y. 2021. Analytical Calculations of Magnetic Fields Induced by MMF Spatial Harmonics in Multiphase Cage Rotor Induction Motors, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, no. 10, pp. 1-12, DOI:10.1109/TMAG.2021.3103643.
- [3] Wang, D., Wu, X., Chen, J., Guo, Y. and Cheng, S. 2015. A Distributed Magnetic Circuit Approach to Analysis of Multiphase Induction Machines With Nonsinusoidal Supply, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 30, no. 2, pp. 522-532. DOI:10.1109/TEC.2014.2362193.
- [4] Bazzi, A. M. 2013. Electric machines and energy storage technologies in EVs and HEVs for over a century, 2013 International Electric Machines & Drives Conference, 12-15 May, Chicago, IL, USA, pp. 212-219. DOI:10.1109/IEMDC.2013.6556255.
- [5] Alsawalhi, J. Y. and Sudhoff, S. D. 2016. Design Optimization of Asymmetric Salient Permanent Magnet Synchronous Machines, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 31, no. 4, 1315-1324. DOI:10.1109/TEC.2016.2575138.
- [6] McGuinness, D. T., Gulbahce, M. O. and Kocabas, D. A., 2015. Novel rotor design for high-speed solid rotor induction machines, 2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 22-25 Oct, Bursa, Türkiye, 579-583, DOI:10.1109/ELECO.2015.7394607.
- [7] Papini, L., Gerada, C., Gerada, D. and Mebarki, A., 2014. High speed solid rotor induction machine: Analysis and performances, 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS),

- 22-25 October, Hangzhou, China, 2759-2765. DOI:10.1109/ICEMS.2014.7013968.
- [8] McGuinness, D. T., Gulbahce, M. O. and Kocabas, D. A., 2015. A performance comparison of different rotor types for high-speed induction motors, 2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 26-28 Nov, Bursa, Turkey, 584-589. DOI:10.1109/ELECO.2015.7394606.
- [9] Jokinen, T., Hrabovcova, V., & Pyrhonen, J. 2013. Design of rotating electrical machines, John Wiley & Sons.
- [10] Aho, T., Nerg, J. and Pyrhonen, J. 2007. Optimizing the Axial Length of the Slitted Solid Iron Rotor, 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 23-25 May, Harbin, China, 255-259, DOI:10.1109/ICIEA.2007.4318410.
- [11] Papini, L. and Gerada, C. 2014. Thermal-electromagnetic analysis of solid rotor induction machine, 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 8-10 April, Manchester, UK, 1-6. DOI:10.1049/cp.2014.0462.
- [12] Kalra, S. 2023. Rotor Material Selection for High-Speed Double Cage Solid Rotor Induction Motor. Journal of Electrical Engineering & Technology, 1-10.
- [13] Lindh, P., Immonen, P., Di, C., Degano, M., & Pyrhönen, J. 2019. Solid-rotor material selection for squirrel-cage high-speed solid-rotor induction machine. In IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 14-17 Oct, Lisbon, Portugal, Vol. 1, 1357-1361. IEEE. DOI:10.1109/IECON.2019.8926736
- [14] Abdo, T. M., & Adly, A. A. 2022. The Outer Solid Rotor Induction Motor as an Alternative for Electric Vehicle Traction Applications. In 2022 Joint MMM-Intermag Conference (INTERMAG), 10-14 Jan., New Orleans, LA, USA, (pp. 1-4). IEEE. DOI:10.1109/INTERMAG39746.2022.9827867
- [15] Chen, S., Han, Y., Ma, Z., Chen, G., Xu, S., & Si, J. 2020. Influence Analysis of Structural Parameters on the Performance of 120° Phase Belts Toroidal Winding Solid Rotor Induction Motor. Energies, Vol.13(20), 5387. DOI:10.3390/en13205387
- [16] Guo, S., Zhou, L., & Yang, T. 2012. An analytical method for determining circuit parameter of a solid rotor induction motor. In 2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 21-24 October, Sapporo, Japan, (pp. 1-6). IEEE.
- [17] Papini, L., & Gerada, C. 2014. Thermal-electromagnetic analysis of solid rotor induction machine. In 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 08-10 April, Manchester, UK, (1-6). IET. DOI:10.1049/cp.2014.0462
- [18] Ergene, Lale T., and Yasemin D. Ertuğrul. 2017. The analytical solution of 2D electromagnetic wave equation for eddy currents in the cylindrical

- solid rotor structures. *Journal of Vibroengineering*, Vol. 19 (5), 3911–3925. DOI:10.21595/jve.2017.18257
- [19] Chen, H., Zhang, J., Zhao, J., Qu, S., & Zhou, Y. 2021. Analytical Calculations of Magnetic Fields Induced by MMF Spatial Harmonics in Multiphase Cage Rotor Induction Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 57(10), 1-12. DOI:10.1109/TMAG.2021.3103643
- [20] Griffiths, D. J. 1998. *Introduction to Electrodynamics*, Prentice Hall, New Jersey, 3th ed., ISBN 0-13-805326-X.
- [21] Jackson, J. D. 1962. *Classical electrodynamics*, John Wiley & Sons, Inc, New York, Chapter 5, LCCN:62-8774,
- [22] Clayton P. R. 2010. *Inductance Loop and Partial*, John Wiley & Sons, ISBN 978-0-470-46188-4, New Jersey A.B.D., Chapter 3, 2010.
- [23] Durak, B. 2020. Adi ve Kısmi Diferansiyel Denklemlerin Çözümlerinin Kollokasyon Yöntemiyle Bulunması, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 10(4), s. 1136-1143. DOI:10.17714/gumusfenbil.681276
- [24] Karakoc, S. B. G. 2018. Kollokasyon Sonlu Eleman Yöntemi İle MKdV Denkleminin Sayısal Çözümleri, Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B - Teorik Bilimler, Cilt 6(2), s. 206-218 . DOI:10.20290/aubtdb.420247
- [25] Aydın, E. S. 2022. Kayısı meyvesinin dondurarak kurutulmasının sayısal olarak incelenmesi için matematiksel bir model, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi , Cilt 37 (1), s. 347-360 . DOI:10.17341/gazimmfd.791792
- [26] Zeybek, H., and Seydi, B. G. K. Application of the Collocation Method With B-Splines to the GEW Equation, *Electronic Transactions on Numerical Analysis*, vol. 46, pp. 71–88, 2017.
- [27] Karakoç, S. B. G., & Zeybek, H. A septic B spline collocation method for solving the generalized equal width wave equation, *Kuwait Journal of Science*, vol. 43, pp. 20–31, 2016.
- [28] Karakoc, S. B. G., Saha, A., & Sucu, D. Y. A collocation algorithm based on septic B-splines and bifurcation of traveling waves for Sawada-Kotera equation. *Mathematics and Computers in Simulation*, 203, 12-27, 2023.
- [29] Ak, T., & Karakoc, S. B. G. A numerical technique based on collocation method for solving modified Kawahara equation. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 3(1), 67-75, 2018.
- [30] Yıldız, H., Korkmaz Can, N., Ozguney, O. C., & Yagiz, N. 2020. Sliding mode control of a line following robot, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42(11), 561. DOI:10.1007/s40430-020-02645-3



ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

## Alüminyum 2024 T351 Malzemeye Delik Delinmesi İşleminde Kesme Parametrelerinin İtme Kuvveti ve İşlem Süresine Göre Optimizasyonu

### Optimization of Cutting Parameters According to Thrust Force and Processing Time in Aluminum 2024 T351 Hole Drilling Process

Yunus Zübeyir Turgut <sup>1</sup>, Murat Özsoy <sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Düzce Üniversitesi Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Düzce, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author\*: ozsoy@sakarya.edu.tr

#### Öz

Delik delmenin imalat sektörü içerisindeki yaygınlığı göz önünde bulundurulduğunda, delik delinen proseslerde takım aşınmasını, harcanan enerjiyi ve süreyi minimize ederek maliyeti düşürmek amaçlanır. Bu da delik delmeye etki eden parametrelerin optimizasyonu ile mümkündür. Bu çalışma kapsamında havacılık ve uzay endüstrisinde oldukça fazla tercih edilen dolayısıyla binlerce delik delme işlemine tabi tutulan Al 2024 T351 alaşımı kullanılarak delik delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kesme parametreleri olarak, kesme hızı (50, 70, 90 ve 110 m/dk) ve diş başı ilerleme miktarı (0,06/0,08/0,1 ve 0,12 mm/diş) ele alınmıştır. Deneyler Taguchi L16(4<sup>2</sup>) deney tasarımına göre 8 mm çaplı üç takım türü (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN kaplamalı) için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Her bir delik için işleme yönündeki (z eksen) maksimum kuvvetler tespit edilmiştir. Tespit edilen bu maksimum itme kuvvetleri kullanılarak Minitab 19 yazılımı yardımıyla Taguchi optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca maksimum itme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonları da gerçekleştirilmiştir. Üç takım türü için de maksimum itme kuvvetleri açısından parametrelerin optimum seviyeleri; kesme hızı için 50 m/dk olarak, diş başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak Taguchi optimizasyonu ile tespit edilmiştir. Maksimum itme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri, kesme hızı için 110 m/dk olarak diş başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak çoklu yanıt optimizasyonu ile tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum 2024 T351, Delik delme, İtme Kuvveti, İşlem Süresi, Optimizasyon

#### Abstract

Considering the prevalence of hole drilling in the manufacturing sector, it is aimed to reduce the cost by minimizing tool wear, energy consumption and time in hole drilling processes. This is possible by optimizing the parameters that affect the drilling. In this study, hole drilling experiments were carried out using Al 2024 T351 alloy, which is highly preferred in the aerospace industry and therefore subjected to thousands of hole drilling processes. Cutting speed (50, 70, 90 and 110 m/min) and feed rate (0.06/0.08/0.1 and 0.12 mm/tooth) were considered as cutting parameters. Experiments were performed separately for three tool types (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN coated) with 8 mm diameter according to Taguchi L16(4<sup>2</sup>) experimental design. The maximum forces in the machining direction (z-axis) were determined for each hole. Taguchi optimizations were carried out with the help of Minitab 19 software by using these determined maximum thrust forces. Also, multiple response optimizations (response surface method) of cutting parameters, which minimize the maximum thrust force and processing time, were carried out. Optimum levels of parameters in terms of maximum cutting force for all three tool types were determined by Taguchi optimization as 50 m/min for cutting speed and 0,06 mm/tooth for feed rate. Optimum levels of cutting parameters that minimize the maximum cutting force and processing time together were determined by multiple response optimization as 110 m/min for cutting speed and 0.06 mm/tooth for feed rate.

**Keywords:** Aluminum 2024 T351, Drilling, Thrust Force, Processing Time, Optimization

#### EXTENDED ABSTRACT

##### Introduction

Machining removes unwanted parts, called chips, from the workpiece using various machines and tools to achieve the desired geometry. The most important advantages of machining

are that it provides good surface quality and dimensional accuracy.

Hole drilling is removing metal to create a cylindrical space on the workpiece by making both progressive and rotational

DOI:10.21205/deufmd.2024267718

Atf şekli / How to cite:

Turgut, Y.Z, Ozsoy, M. (2024). Alüminyum 2024 T351 Malzemeye Delik Delinmesi İşleminde Kesme Parametrelerinin İtme Kuvveti ve İşlem Süresine Göre Optimizasyonu. DEUFMD, 26(77), 333-340.

Geliş Tarihi / Received: 14.12.2022

Kabul Tarihi / Accepted: 04.12.2023



movements of the cutting tool (drill). It also includes methods such as broaching, reaming, countersinking, and hole enlargement. It constitutes 33% of all machining operations and 25% of the energy spent in all machining processes. Therefore, it is one of the most important material removal methods. For this reason, reducing the cost by minimizing tool wear, energy consumed, and time in hole drilling operations is important. This is possible by optimizing the parameters affecting drilling.

When the literature is examined, we see that many studies have been carried out to conduct hole drilling operations under optimum conditions.

Within the scope of this study, hole-drilling experiments were carried out using Al 2024 T351 alloy, which is preferred in the aviation and space industry and has been subjected to thousands of hole-drilling processes. The liquid cooling method was used while drilling the holes. Cutting speed (50, 70, 90, and 110 m/min) and feed per tooth (0.06/0.08/0.1 and 0.12 mm/tooth) were considered cutting parameters. The experiments were carried out separately for three tool types (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 with TiAlN coating) with 8 mm diameter according to the Taguchi L16(4<sup>2</sup>) experimental design. The maximum force (thrust force) in the machining direction (z-axis) was determined in each experiment. Minimizing the thrust forces during drilling reduces costs by minimizing tool wear and energy consumed. However, it was observed that the manufacturing time increased only when the maximum thrust force was tried to be minimized. Since the increase in manufacturing time will negatively affect operating costs, multiple response optimizations (response surface method) of cutting parameters that minimize maximum thrust force and processing time have also been carried out.

## Materials and Methods

Aluminum 2024 T351 alloy is frequently used in the aviation and space industry due to its lightness and good fatigue resistance. Therefore, many holes are drilled on this material. The drilling operations that will be applied in large numbers must be carried out with maximum efficiency and quality.

Within the scope of this study, lower-cost HSS (high-speed tool steel) drills were preferred compared to carbide drills. Ruko

brand 8 mm diameter HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 (TiAlN coated) drills were used.

The experiments were conducted in the Taksan TMC-700 V CNC vertical machining center with FANUC (O-M Series) control panel at Sakarya University Faculty of Engineering Mechanical Engineering Laboratory. Force data was collected using ESIT AX3 load cell, NI 9237 module of NI cDAQ-9188 data acquisition unit, and Flexlogger software.

## Results and Discussion

Optimum levels of cutting parameters were determined by Taguchi optimization. For all three drill types, the cutting speed parameter's optimum level was 50 m/min, and the optimum level of the feed rate per tooth was 0.06 mm/tooth.

Response Surface optimization was performed separately for three drill types (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 with TiAlN coating). The results were the same for all three drill types. The optimum levels of the cutting parameters, which minimize the maximum thrust force and processing time together, were determined as 110 m/min for the cutting speed and 0.06 mm/tooth for the feed rate per tooth. Desirability function values of response surface optimization findings It was found to be 0.8804 for the HSS drill, 0.8513 for the HSSE-Co5 drill, and 0.8750 for the HSSE-Co5 (TiAlN coated) drill. When the results obtained were examined, it was concluded that the multiple response optimization was statistically significant.

During the experiments, force measurements were made in all three axes (FX, FY, FZ). In all experiments, it was determined that the forces measured in the x and y axes were significantly lower than those measured in the z axes. For this reason, within the scope of this study, the forces in the z-axis were evaluated as thrust forces and statistical analyses were made based on their maximum values.

These results obtained from the drilling process of Al 2024 T351 alloy with 8 mm diameter HSS, HSSE-Co5, and HSSE-Co5 (TiAlN coated) drills can be used in future academic studies and industrial applications.

## 1. Giriş

Talaşlı imalat, istenen geometrinin sağlanması için çeşitli tezgâh ve çeşitli takımlar aracılığıyla iş parçası üzerinden talaş adı verilen istenmeyen kısımların uzaklaştırılması işlemidir. Talaşlı imalatın iyi bir yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti sağlaması en önemli avantajlarından.

Delik delme, kesici takımın (matkap) hem ilerleme hem dönme hareketi yaparak iş parçası üzerinde silindirik boşluk oluşturmak için talaş kaldırması işlemidir. Broşlama, raybalama, havşa açma, delik büyütme gibi yöntemleri de kapsamaktadır [1]. Tüm talaş kaldırma operasyonlarının %33'ünü ve tüm talaş kaldırma proseslerinde harcanan enerjini %25'ini oluşturmaktadır [2]. Dolayısıyla en önemli talaş kaldırma yöntemlerinden biridir. Bu sebeple delik delme operasyonlarında takım aşınmasını, harcanan enerjiyi ve süreyi minimize ederek maliyeti düşürmek önem arz etmektedir. Bu da delik delmeye etki eden parametrelerin optimizasyonu ile mümkündür.

Literatür incelendiğinde delik delme operasyonlarının optimum şartlarda gerçekleştirilmesi için birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Zhu ve arkadaşları [3], Al 2024 T351 alaşımına üç farklı soğutma koşulunda (kuru, hava ve minimum miktarda

yağlama) delikler delmişlerdir. Bu üç soğutma koşulunu sıcaklık ve itme kuvveti açısından kıyaslamışlardır. Kesme hızı seviyelerini 60, 80, 100, 120 m/dk olarak, diş başı ilerleme seviyelerini ise 0,2/0,3/0,4/0,5 mm/diş olarak belirlemişlerdir. Sıcaklığının, kesme hızına kıyasla diş başı ilerleme miktarından daha çok etkilendiğini saptamışlardır. Minimum miktarda yağlama (MMY) soğutma tekniğinin kullanıldığı deneylerde, kuru ve hava soğutmaya kıyasla matkap üzerindeki sıcaklık farklarının daha düşük olduğu sonucuna varmışlardır. Fakat itme kuvveti ve sıcaklık açısından en iyi takım performansını hava soğutma tekniğinde elde ettiklerini ifade etmişlerdir.

Bonhin ve arkadaşları [4], cam elyaf takviyeli Al 2024-T3 malzeme üzerinde delik delme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Devir sayısı (4000 ve 8000 dev/dk) ve diş başı ilerleme miktarı (0,05/0,1 ve 0,2 mm/diş) parametrelerinin itme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneyleri 4,8 mm çaplı TiAlN kaplamalı karbür matkapla gerçekleştirmişlerdir. Araştırmalar sonucunda itme kuvvetinin ve talaş kalınlığının, devir sayısına kıyasla diş başı ilerleme miktarından daha fazla etkilendiği sonucuna varmışlardır.

Landon ve arkadaşları [5], Al 2024-T351 malzemenin delinmesi işleminde yüzey durumunu ve yorulma mukavemetini

araştırmışlardır. Delikleri aksel ve yörüngesel olarak iki farklı şekilde delmişlerdir. Yüzey durumunu; yüzey pürüzlülük ölçümleri, mikro yapı, sertleşme analizi ve artık gerilme değerlendirilmesi kapsamında incelemişlerdir. Düşük pürüzlülük değerlerinde, delik pürüzlülüğünün yorulma mukavemetine etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Geleneksel aksel delmenin, yörüngesel delmeye kıyasla artık gerilme oluşturabileceğini ifade etmişlerdir.

Aamir ve arkadaşları [6], Al 2024 T3 alaşımının delinmesinde devir sayısı (1020, 2035 ve 3050 dev/dk), dış başı ilerleme miktarı (0,04/0,08 ve 0,14 mm/diş) ve matkap çapı (6 ve 10 mm) parametrelerinin; itme kuvveti, delik kalitesi, talaş morfolojisi ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin araştırmışlardır. Deneysel kullandıkları matkapları kaplamasız olarak tercih etmişlerdir. Varyans analizi sonuçlarına göre itme kuvvetinin dış başı ilerleme miktarı ve matkap çapından büyük ölçüde etkilendiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca yüksek devir sayılarında daha fazla yüzey pürüzlülüğü oluştuğunu ve matkap çapı arttıkça talaş kalınlığının da arttığını ifade etmişlerdir.

Saravanakumar ve arkadaşları [7], takviye ilave ettikleri Al 2219 alaşımı üzerinde delik delme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Devir sayısı (800 ve 1600 dev/dk), ilerleme hızı (75 ve 150 mm/dk), matkap çapı (6 ve 10 mm) ve takviye türü (Grafit ve MoS<sub>2</sub>) parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisini araştırmışlardır. Parametrelerin optimum seviyelerini; 1600 dev/dk devir sayısı, 75 mm/dk ilerleme hızı, 6 mm matkap çapı ve Grafite takviye olarak tespit etmişlerdir. Parametreler arasında yüzey pürüzlülüğü açısından en önemli parametrenin takviye türü olduğunu ve Grafite takviyesinin MoS<sub>2</sub> takviyesine göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Dahnel ve arkadaşları [8], Al 7075 alaşımının delinmesinde kesme hızı (22, 44 ve 66 m/dk) ve soğutma türü (kuru ve sıvı soğutma) parametrelerinin takım aşınması ve talaş yapısı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneysel kullandıkları matkap ve sabit dış başı ilerleme miktarı (0,15 mm/diş) kullanmışlardır. Kesme sıvısı kullanılan deneylerde kuru delmeye kıyasla daha az takım aşınması görüldüğünü ve daha küçük yapıda talaş oluştuğunu tespit etmişlerdir. Soğutma sıvısı kullanılarak 44 m/dk kesme hızı ile delinen deliklerde en az takım aşınması görüldüğünü de belirtmişlerdir.

Korkmaz ve arkadaşları [9], Al 2014 alaşımının delinmesi işleminde itme kuvvetlerinin hem deneysel olarak hem de bilgisayar destekli simülasyon yardımıyla elde etmişlerdir. Deneysel kullandıkları matkap ve sabit dış başı ilerleme için ise 0,1/0,2/0,3 mm/diş seviye değerleri kullanılmıştır. Sabit dış başı ilerleme miktarı için kesme hızının artırılmasının itme kuvvetini düşürdüğünü, sabit kesme hızı için dış başı ilerleme miktarının artırılmasının ise itme kuvvetini artırdığını tespit etmişlerdir. Deneysel ve simülasyon çıktılarının birbiri ile benzerlik gösterdiğini de belirtmişlerdir.

Navaneethakrishnan ve arkadaşları [10], alüminyum alaşımının (IS737.Gr19000) delinmesinde matkaba uygulanan kriyojenik işlemin etkisini araştırmışlardır. Kriyojenik işlemin etkisini; talaş boyutu, itme kuvveti, tork, ovalite ve yüzey pürüzlülüğü çıktıları açısından incelemişlerdir. Deneysel kullandıkları matkap ve sabit dış başı ilerleme için ise 0,038/0,076 ve 0,203 mm/diş parametrelerini dikkate almışlardır. Kriyojenik işlemin; matkap aşınması, ovalite, yüzey pürüzlülüğü ve talaş boyutu üzerinde olumlu etkileri olduğunu belirtmişlerdir.

Yaşar [11], Al 7075 alaşımının delinmesi işlemini hem deneysel olarak hem de sonlu elemanlar metodu yardımıyla itme kuvveti açısından araştırmıştır. Ayrıca deneysel çalışmalarda yüzey pürüzlülüğünü de incelemiştir. Deneysel kullandıkları matkap ve sabit dış başı ilerleme için ise 0,038/0,076 ve 0,203 mm/diş parametrelerini dikkate almışlardır. Kriyojenik işlemin; matkap aşınması, ovalite, yüzey pürüzlülüğü ve talaş boyutu üzerinde olumlu etkileri olduğunu belirtmişlerdir.

120 m/dk), dış başı ilerleme miktarı (0,05/0,1 ve 0,15 mm/diş), matkap uç açısı (120°, 130° ve 140°) ve kaplama türü (kaplamalı/kaplamasız) parametrelerini dikkate almıştır. Deneysel kullandıkları matkapları kaplamasız olarak tercih etmişlerdir. Deneysel kullandıkları matkapları kaplamasız olarak tercih etmişlerdir. Deneysel kullandıkları matkapları kaplamasız olarak tercih etmişlerdir. Deneysel kullandıkları matkapları kaplamasız olarak tercih etmişlerdir.

Demir ve arkadaşları [12], 4 ve 6 mm kalınlıklarındaki ön delinmiş Al 7075 T651 iş parçalarına HSS matkaplarla 8 ve 10 mm çaplı delikler delmişlerdir. Ön delik çapının (1,5/2/2,5/3/3,5 ve 4 mm) ve derinliğinin (1, 2, 3 ve 4 mm), delik yüzey pürüzlülüğüne ve delikte oluşan kovan geometrisine etkisini araştırmışlardır. Oluşan etkileri göz önüne alarak 8 mm çapındaki bir delik için en uygun ön delik çapının 2,5-3 mm, 10 mm çapındaki bir delik için en uygun ön delik çapının ise 3-3,5 mm olduğunu ve ideal ön delik derinliğinin 2-3 mm arasında olduğunu ifade etmişlerdir.

Bu çalışma kapsamında da havacılık ve uzay endüstrisinde tercih edilen dolayısıyla binlerce delik delme işlemine tabi tutulan Al 2024 T351 alaşımı kullanılarak delik delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deliklerin delinmesi sırasında sıvı soğutma metodu kullanılmıştır. Kesme parametreleri olarak, kesme hızı (50, 70, 90 ve 110 m/dk) ve dış başı ilerleme miktarı (0,06/0,08/0,1 ve 0,12 mm/diş) ele alınmıştır. Deneysel kullandıkları matkapları kaplamasız olarak tercih etmişlerdir. Deneysel kullandıkları matkapları kaplamasız olarak tercih etmişlerdir. Deneysel kullandıkları matkapları kaplamasız olarak tercih etmişlerdir. Deneysel kullandıkları matkapları kaplamasız olarak tercih etmişlerdir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Alüminyum 2024 T351 alaşımı

Alüminyum alaşımları, kompozitlerin ve yeni hafif malzemelerin geliştirilmesine rağmen başta havacılık ve uzay endüstrisi olmak üzere otomotiv, inşaat, denizcilik endüstrileri gibi birçok sektörde tercih edilmektedir. Bu sebeple alüminyum alaşımlarının pazar payı her sene daha da artmaktadır. Alüminyum alaşımlarının havacılık ve uzay endüstrisinde ön plana çıkması, birçok perçinli ve civatalı bağlantıların gerçekleştirilmesi için binlerce delik delme işlemini beraberinde getirir [13].

Alüminyum 2024 T351 alaşımı hafiflik ve iyi yorulma direnci sebebiyle havacılık ve uzay endüstrisinde uzun süredir kullanılmaktadır [14]. Dolayısıyla bu malzeme üzerinde çok sayıda delik delme işlemi gerçekleştirilir. Binlerce kez uygulanacak delik delme işlemlerinin, maksimum verimde ve kalitede gerçekleştirilmesi önem arz etmektedir.

### 2.2. Kesici takımlar (Matkaplar)

Bu çalışma kapsamında karbür matkaplara göre daha düşük maliyetli HSS (yüksek hız takım çeliği) matkaplar tercih edilmiştir. Ruko markasına ait 8 mm çaplı HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkaplar kullanılmıştır. Matkaplara ait teknik bilgiler Tablo 1.'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Kullanılan kesici takımların teknik özellikleri**Table 2.** Technical specifications of the cutting tools

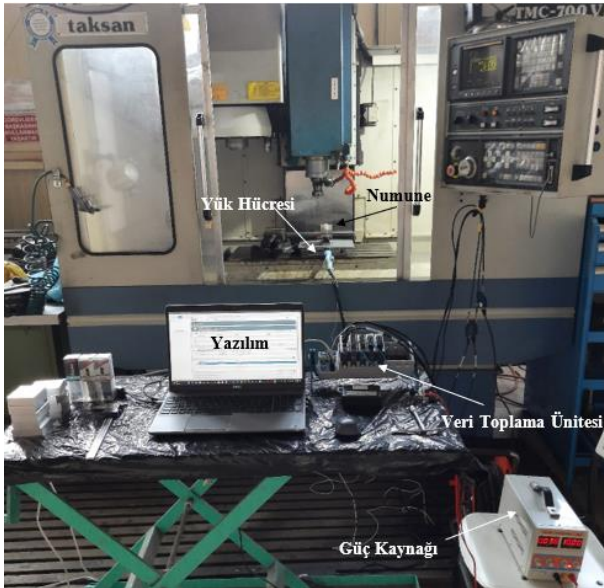
Kesici takım	Toplam uzunluk (mm)	Kanal uzunluğu (mm)	Tepe açısı	Helis açısı
HSS	117	75	118°	25-30°
HSSE-Co5 (Kaplamasız)	117	75	130°	36°
HSSE-Co5 (Kaplmalı)	117	75	130°	36°

Şekil 1.'de yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkaplar gösterilmiştir.

**Şekil 1.** Kesici takımlar**Figure 2.** Cutting tools

### 2.3. Deneysel düzeneği

Şekil 2.'de deneysel düzeneği gösterilmiştir. Deneysel, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'ndaki FANUC (O-M Serisi) kontrol paneline sahip Taksan TMC-700 V CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Kuvvet verileri; ESİT AX3 yük hücresi, NI cDAQ-9188 veri toplama ünitesinin NI 9237 modülü ve Flexlogger yazılımı kullanılarak toplanmıştır.

**Şekil 3.** Deneysel düzeneği**Figure 4.** The experimental setup

### 2.4. Taguchi Deneysel Tasarımı

Taguchi deneysel tasarımı, en az zaman kaybı ve maliyetle deneysel planlanmasını amaçlar. Bu çalışma kapsamında ele alınan deneysel parametreleri ve seviyeleri Tablo 2'de ifade edilmiştir.

**Tablo 3.** Deneysel parametreleri ve seviyeleri**Table 4.** Experimental parameters and levels

Deneysel Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
------------------------	----------	----------	----------	----------

Kesme Hızı (m/dk)	50	70	90	110
Diş başı ilerleme (mm/diş)	0,06	0,08	0,1	0,12

Tablo 2'de belirtilen 2 parametre ve 4 seviye göz önüne alınarak L16(4<sup>2</sup>) ortogonal dizisi seçilmiştir. Seçilen bu ortogonal diziyeye göre planlanmış deneysel tasarımı Tablo 3.'te ifade edilmiştir.

**Tablo 5.** Deneysel tasarımı**Table 6.** Experimental design

Deneysel No.	Kesme hızı (m/dk)	Diş başı ilerleme (mm/diş)
1	50	0,06
2	50	0,08
3	50	0,1
4	50	0,12
5	70	0,06
6	70	0,08
7	70	0,1
8	70	0,12
9	90	0,06
10	90	0,08
11	90	0,1
12	90	0,12
13	110	0,06
14	110	0,08
15	110	0,1
16	110	0,12

### 2.5. Taguchi optimizasyonu

Taguchi optimizasyonunda, deneysel sonuçları değerlendirilerek en uygun parametre seviyeleri tespit edilebilmektedir. Bu değerlendirme işlemi sinyal/gürültü oranı (S/G) denilen bir oranla gerçekleştirilmektedir. Problemlerin hedefine göre sinyal/gürültü oranı hesaplamak için kullanılacak denklem değişmektedir. Bu çalışma kapsamında itme kuvvetinin düşük tutulması istendiğinden en küçük-en iyi hedefine uygun sinyal/gürültü oranı denklemi kullanılmıştır (Denklem 1). Denklem 1'deki Y kalite değişkenini, n gözlem sayısını ifade etmektedir [15]. Maksimum S/G oranını veren parametre seviyesi optimum seviyedir.

$$S/G = -10 \log \left[ \sum (Y^2) / n \right] (dB) \quad (1)$$

Bu çalışma kapsamındaki S/G oranı hesapları ve Taguchi optimizasyonları Minitab 19 yazılımı yardımıyla yapılmıştır.

### 2.6. Yanıt yüzey metodu ile optimizasyon

Yanıt yüzey metodu, birçok bilim dalında ve çeşitli endüstriyel alanlarda kapsamlı bir şekilde uygulanan yöntemdir [16]. Yanıt ifadesi bağımlı değişkeni temsil etmektedir. Bu yöntem yanıt üzerinde etkili olan parametreleri bulmak, bir veya daha fazla yanıt için parametrelerin optimum seviyelerini belirlemek, yanıt ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi temsil eden matematiksel modelleri elde etmek gibi amaçlarla kullanılır [17]. Bu amaçlar doğrultusunda süreçlerin veya problemlerin optimize edilmesi sağlanır.

Yanıt yüzey metodu kullanılarak bir yanıt için parametrelerin optimum seviyelerinin belirlenmesine yanıt optimizasyonu denilmektedir. Eğer yanıt sayısı birden fazla ise gerçekleştirilen optimizasyon çoklu yanıt optimizasyonudur. Çoklu yanıt veya yanıt optimizasyonlarında parametrelerin optimum seviyelerini tespit etmek için desirability fonksiyonu kullanılır (denklem 3). Desirability fonksiyonunun değeri ( $d_i$ ) 0 ile 1 arasındadır. Değer 1'e yaklaştıkça optimizasyon işleminin istatistiksel olarak tutarlılığı artar. Denklem 3'teki  $T$  yanıtın hedef değerini,  $y_i$  yanıt için kabul edilebilir alt sınır değerini,  $U$  yanıt için kabul edilebilir üst sınırı ve  $W$  ağırlığı temsil etmektedir [18].

$$d_i = \begin{cases} 1 & y_i < T \\ \left(\frac{U - y_i}{U - T}\right)^w & T \leq y_i \leq U \\ 0 & y_i > U \end{cases} \quad (3)$$

Bu çalışma kapsamında Minitab 19 yazılımı yardımıyla çoklu yanıt optimizasyonları gerçekleştirilerek iki yanıtı minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri tespit edilmiştir. Çalışmada ele alınan yanıtlar, işlem süresi ve maksimum itme kuvvetidir. Kullanılan her bir matkap (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN kaplamalı) için ayrı ayrı çoklu yanıt optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulguların desirability fonksiyonu değerleri incelenmiştir.

### 2.7. Üstel düzeltme metodu

Üstel düzeltme metodu, veri toplama sırasında oluşan ve gürültü olarak tabir edilen sinyal sıçramalarını azaltan (yumuşatan) bir yöntemdir. Sinyal gürültüleri neticesinde oluşan verilerin yerine yeni öngörülerde bulunulur. Bu öngörüler, denklem 4 kullanılarak elde edilir.

$$Z_T = \alpha Z_{T-1} + (1 - \alpha) S_{T-1} \quad (4)$$

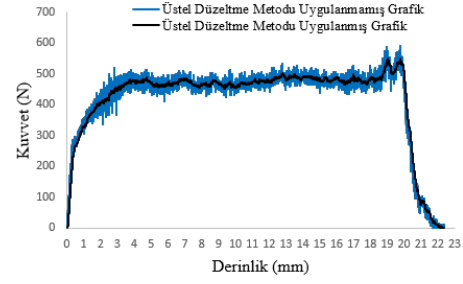
$Z_T$  öngörülen değeri,  $Z_{T-1}$  öngörülen bir önceki değeri,  $S_{T-1}$  bir önceki gerçek değeri ve  $\alpha$  düzeltme katsayısını ifade etmektedir. Bu çalışmadaki üstel düzeltme yöntemi hesaplamaları Excel yazılımında gerçekleştirilmiştir.

### 3. Deneysel Bulgular

Delik delme deneyleri, 8 mm çaplı her bir takım türü (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN kaplamalı) için 60x70x20 mm uzunluklarında alüminyum 2024 T351 alaşımı numune kullanılarak Tablo 3'teki deney tasarımına göre gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ölçümü üç ekseninde ( $F_x$ ,  $F_y$  ve  $F_z$ ) gerçekleştirilmiştir; fakat işleme yönündeki ( $z$  eksen) maksimum kuvvetler baz alınarak optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bunun sebebi  $x$  ve  $y$  eksenlerinde oluşan kuvvetlerin işleme yönü olan  $z$  eksenindeki kuvvetlere (itme kuvveti) nazaran oldukça düşük değerdedir.

#### 3.1. Maksimum itme kuvvetlerinin tespiti

Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak Kuvvet-Derinlik grafikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan veri grafiklerinde sinyal gürültülerinin mevcut olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple verilere Excel yazılımında üstel düzeltme metodu uygulanarak sinyal gürültülerinin sebep olduğu anlam ifade etmeyen veriler minimize edilmeye çalışılmıştır. Üstel düzeltme metodu uygulanmış veriler üzerinden de maksimum kuvvetler tespit edilmiştir (Şekil 3.).



Şekil 5. Üstel düzeltme metodunun sinyal gürültüleri üzerindeki etkisi

Figure 6. Effect of exponential smoothing method on signal noise

### 3.2. Deneysel sonuçları

Tablo 4.'te HSS, Tablo 5.'te HSSE-Co5 ve Tablo 6.'da HSS Co5 TiAlN kaplamalı matkaplarla delinen deliklere ait maksimum itme kuvveti ( $F_{z,max}$ ) sonuçları ve işlem süreleri belirtilmiştir. Kesme hızı ( $V_c$ ) ve diş başına ilerleme miktarı ( $f_z$ ) kesme parametreleridir.

Table 7. HSS matkap ile delinen deliklere ait deney sonuçları

Deney No	$V_c$ (m/dk)	$f_z$ (mm/diş)	Süre (s)	$F_{z,max}$ (N)
1	50	0,06	11,29	306
2	50	0,08	8,45	351
3	50	0,1	6,75	450
4	50	0,12	5,62	498
5	70	0,06	8,05	306
6	70	0,08	6,03	402
7	70	0,1	4,82	471
8	70	0,12	4,02	525
9	90	0,06	6,25	333
10	90	0,08	4,70	498
11	90	0,1	3,75	531
12	90	0,12	3,13	567
13	110	0,06	5,11	349
14	110	0,08	3,84	451
15	110	0,1	3,07	526
16	110	0,12	2,56	633

Table 8. Experimental results of holes drilled with HSS drill

Deney No	$V_c$ (m/dk)	$f_z$ (mm/diş)	Süre (s)	$F_{z,max}$ (N)
1	50	0,06	11,03	285
2	50	0,08	8,25	352
3	50	0,1	6,59	438
4	50	0,12	5,49	544
5	70	0,06	7,86	300
6	70	0,08	5,88	383
7	70	0,1	4,70	455
8	70	0,12	3,93	549
9	90	0,06	6,10	332
10	90	0,08	4,59	446
11	90	0,1	3,67	531
12	90	0,12	3,05	585
13	110	0,06	4,99	348
14	110	0,08	3,75	468
15	110	0,1	3,00	516
16	110	0,12	2,50	582

Table 9. HSSE-Co5 matkap kullanılan deney sonuçları

Table 10. Experimental results using HSSE-Co5 drill

**Tablo 11.** HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılan deney sonuçları**Table 12.** Experimental results using HSSE-Co5 (TiAlN coated) drill

Deney No	V <sub>c</sub> (m/dk)	f <sub>z</sub> (mm/diş)	Süre (s)	F <sub>z,maks</sub> (N)
1	50	0,06	11,03	314
2	50	0,08	8,25	395
3	50	0,1	6,59	443
4	50	0,12	5,49	513
5	70	0,06	7,86	306
6	70	0,08	5,88	418
7	70	0,1	4,70	485
8	70	0,12	3,93	566
9	90	0,06	6,10	353
10	90	0,08	4,59	464
11	90	0,1	3,67	485
12	90	0,12	3,05	578
13	110	0,06	4,99	351
14	110	0,08	3,75	460
15	110	0,1	3,00	511
16	110	0,12	2,50	631

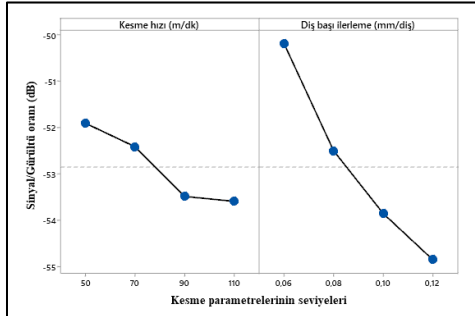
Şekil 4.'te örnek olarak HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delik delinen numune gösterilmiştir.

**Şekil 7.** HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delik delinen numune**Şekil 8.** The test sample drilled with a HSSE-Co5 (TiAlN coated) drill

#### 4. Optimizasyon

##### 4.1. HSS matkap ile delinen deliklerin maksimum itme kuvveti verilerine göre kesme parametrelerinin Taguchi optimizasyonu

HSS matkap için en küçük en iyi hedef türüne göre hesaplanan kesme parametrelerin sinyal/gürültü oranları Şekil 5.'te gösterilmiştir.

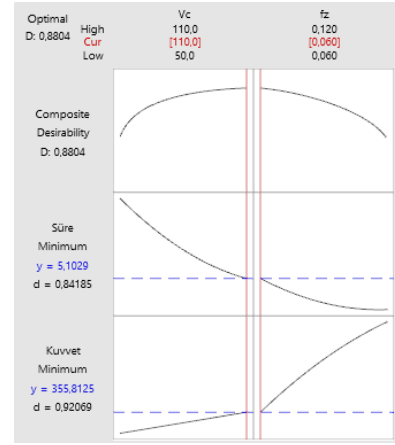
**Şekil 9.** HSS matkap kullanılarak gerçekleştirilen deney parametrelerinin sinyal/gürültü oranı grafikleri**Şekil 10.** Signal/noise ratio graphs of experimental parameters performed using HSS drill

HSS matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin maksimum itme kuvveti verilerine göre; kesme hızı (V<sub>c</sub>) parametresinin

optimum seviyesi 50 m/dk olarak, diş başı ilerleme miktarı parametresinin optimum seviyesi ise 0,06 mm/diş olarak Taguchi optimizasyonu yardımıyla tespit edilmiştir.

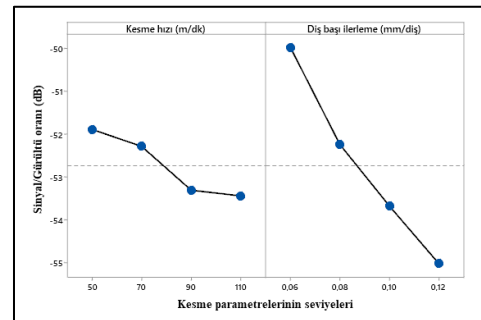
##### 4.2. HSS matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum itme kuvveti ve süre verilerine göre kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonu

HSS matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları Şekil 6.'da belirtilmiştir. Maksimum itme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri, kesme hızı için 110 m/dk olarak diş başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak tespit edilmiştir. Y değerleri, deney çıktılarının optimize edilmiş değerleridir. İtme kuvveti için 355,8125 N, işlem süresi için 5,1029 saniye optimum değerlerdir. Optimizasyonun desirability fonksiyonu değeri 0,8804 olarak hesaplanmıştır. Desirability fonksiyonu değerinin 1'e yaklaşması optimizasyonun istatikselsel olarak tutarlılığını artırmaktadır. Dolayısıyla gerçekleştirilen optimizasyonun istatikselsel olarak tutarlı olduğu ifade edilebilir.

**Şekil 11.** HSS matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları**Şekil 12.** Results of multiple response optimization based on data from experiments using HSS drill

##### 4.3. HSSE-Co5 matkap ile delinen deliklerin maksimum itme kuvveti verilerine göre kesme parametrelerinin Taguchi optimizasyonu

HSSE-Co5 matkap için en küçük en iyi hedef türüne göre hesaplanan kesme parametrelerin sinyal/gürültü oranları Şekil 7.'de gösterilmiştir.

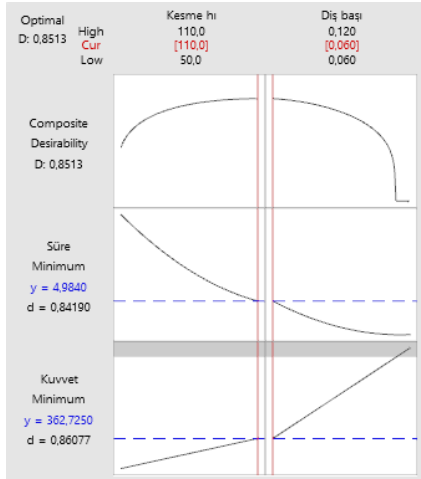
**Şekil 13.** HSSE-Co5 matkap kullanılarak gerçekleştirilen deney parametrelerinin sinyal/gürültü oranı grafikleri**Şekil 14.** Signal/noise ratio graphs of experimental parameters performed using HSS-Co5 drill



HSSE-Co5 matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde; kesme hızı ( $V_c$ ) parametresinin optimum seviyesi 50 m/dk olarak, diş başı ilerleme miktarı parametresinin optimum seviyesi ise 0,06 mm/diş olarak Taguchi optimizasyonu yardımıyla tespit edilmiştir.

#### 4.4. HSSE-Co5 matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum itme kuvveti ve süre verilerine göre kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonu

HSSE-Co5 matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları Şekil 8'de belirtilmiştir. Maksimum itme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri, kesme hızı için 110 m/dk olarak diş başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak tespit edilmiştir. Y değerleri, deney çıktılarının optimize edilmiş değerleridir. itme kuvveti için 362,7250 N, işlem süresi için 4,9840 saniye optimum değerlerdir. Optimizasyonun desirability fonksiyonu değeri 0,8513 olarak hesaplanmıştır. Desirability fonksiyonu değerinin 1'e yaklaşması optimizasyonun istatistiksel olarak tutarlılığını artırmaktadır. Dolayısıyla gerçekleştirilen optimizasyon istatistiksel olarak tutarlı olduğu ifade edilebilir.

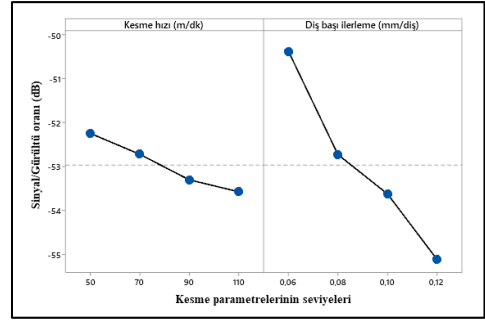


Şekil 15. HSSE-Co5 matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları

Şekil 16. Results of multiple response optimization based on data from experiments using HSS-Co5 drill

#### 4.5. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delinen deliklerin maksimum itme kuvveti verilerine göre kesme parametrelerinin Taguchi optimizasyonu

HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap için en küçük en iyi hedef türüne göre hesaplanan kesme parametrelerinin sinyal/gürültü oranları Şekil 9'da gösterilmiştir. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde; kesme hızı ( $V_c$ ) parametresinin optimum seviyesi 50 m/dk olarak, diş başı ilerleme miktarı parametresinin optimum seviyesi ise 0,06 mm/diş olarak Taguchi optimizasyonu yardımıyla tespit edilmiştir.

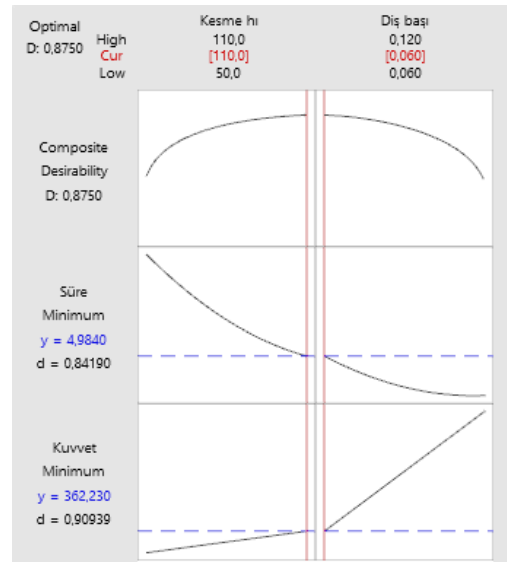


Şekil 17. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılarak gerçekleştirilen deney parametrelerinin sinyal/gürültü oranı grafikleri

Şekil 18. Signal/noise ratio graphs of experimental parameters performed using HSS-Co5 (TiAlN coated) drill

#### 4.6. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum itme kuvveti ve süre verilerine göre kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonu

HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları Şekil 10'da belirtilmiştir. Maksimum itme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri, kesme hızı için 110 m/dk olarak diş başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak tespit edilmiştir. Y değerleri, deney çıktılarının optimize edilmiş değerleridir. İtme kuvveti için 362,230 N, işlem süresi için 4,9840 saniye optimum değerlerdir. Optimizasyonun desirability fonksiyonu değeri 0,8750 olarak hesaplanmıştır. Desirability fonksiyonu değerinin 1'e yaklaşması optimizasyonun istatistiksel olarak tutarlılığını artırmaktadır. Dolayısıyla gerçekleştirilen optimizasyonun istatistiksel olarak tutarlı olduğu ifade edilebilir.



Şekil 19. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları

Şekil 20. Results of multiple response optimization based on data from experiments using HSS-Co5 (TiAlN coated) drill

## 5. Sonuçlar

İtme kuvvetini minimize eden kesme parametrelerin optimum seviyeleri Taguchi optimizasyonu ile tespit edilmiştir. Üç matkap türü için de kesme hızı parametresinin optimum seviyesi 50 m/dk olarak, dış başı ilerleme miktarı parametresinin optimum seviyesi ise 0,06 mm/diş olarak bulunmuştur.

Çoklu yanıt optimizasyonu üç matkap türü (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN kaplamalı) için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar üç matkap türü için de aynı bulunmuştur. Maksimum itme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri, kesme hızı için 110 m/dk olarak dış başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak tespit edilmiştir. Çoklu yanıt optimizasyonu bulgularının desirability fonksiyonu değerleri; HSS matkap için 0,8804, HSSE-Co5 matkap için 0,8513 ve HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap için 0,8750 olarak bulunmuştur. Bulunan bu değerler değerlendirildiğinde yapılan çoklu yanıt optimizasyonunun istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Deneyler esnasında üç eksen de kuvvet (FX, FY, FZ) ölçümü gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen tüm deneylerde, x ve y ekseninde ölçülen kuvvetlerin z ekseninde ölçülen kuvvetlere göre oldukça düşük değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple bu çalışma kapsamında, z eksenindeki kuvvetler itme kuvveti olarak değerlendirilip maksimum değerleri baz alınarak istatistiksel analizler yapılmıştır.

Kuvvetlerin ölçümü sırasında sinyal gürültüleri neticesinde oluşan veriler tespit edilmiştir. Elde edilen tüm deney verilerine, Excel yazılımında üstel düzeltme veri çözümleme metodu uygulanarak sinyal gürültülerinin neden olduğu anlam ifade etmeyen veriler azaltılmaya çalışılmıştır.

Al 2024 T351 alaşımının 8 mm çaplı HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkaplarla delinmesi işleminde elde edilen bu sonuçlar daha sonra yapılacak akademik çalışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir.

### Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

### Yazar katkılarının beyanı

Yunus Zübeyir Turgut: Deney tasarımı, veri toplama, analizlerin gerçekleştirilmesi, literatür taraması, yazım.

Murat Özsoy: Fikir oluşturma, deney tasarımı, veri toplama, yazım.

### Kaynaklar

- [1] Çakır, M. C. 2010. Delik Delme. ss 349-473. Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri, Dora Yayınları, 525s.
- [2] Yıldız, A. 2021. Delik Delme İşleminin Simülasyonu ve Delik Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerine Bağlı Mekanik Gerilmelerin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 124s, Ankara.
- [3] Zhu, Z., He B., Chen, J. 2020. Evaluation Of Tool Temperature Distribution In MQL Drilling Of Aluminum 2024-T351, Journal of Manufacturing Processes, Cilt. 56, s. 757-765. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.05.029>.
- [4] Bonhin, E. P., David-Müzel, S., Guidi, E. S., Botelho, E. C., Ribeiro, M. V. 2020. Influence Of Drilling Parameters On Thrust Force And Burr On Fiber Metal Laminate (Al 2024-T3/glass fiber reinforced epoxy), Procedia CIRP, Cilt. 101, s. 338-341. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.02.035>.
- [5] Landon Y., Lacombe, A., Souop, L. A. K., Daidié, A., Paredes, M., Chiról, C., Benaben, A. 2022. Impact Of The Drilling Process On The Surface Integrity And Residual Fatigue Strength Of 2024-T351 Aluminum Parts, Procedia CIRP, Cilt. 108, s. 459-464. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.072>.

- [6] Aamir, M., Giasin, K., Tolouei-Rad, M., Din, I. U., Hanif, M. I., Kuklu, U., Pimenov, D. Y., Ikhak M. 2021. Effect Of Cutting Parameters And Tool Geometry On The Performance Analysis Of One-Shot Drilling Process Of AA2024-t3, Metals, Cilt. 11(6), s. 854-866. <https://doi.org/10.3390/met11060854>.
- [7] Saravanakumar, A., Sreenivas, P., Vijaya kumar, S., Pradeep kumar U., Rajeshkumar, L. 2022. Optimization Of Drilling Process Parameters For Self-Lubricants Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites, Materials Today Proceedings, Cilt. 52, s. 1461-1465. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.196>.
- [8] Dahnel, A. N., Fauzi, M. H., Raof, N. A., Mokhtar, S., Khairussaleh, N. K. M. 2022. Tool Wear And Burr Formation During Drilling Of Aluminum Alloy 7075 In Dry And With Cutting Fluid, Material Today Proceedings, Cilt. 59, s. 808-813. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.110>.
- [9] Korkmaz, M. E., Çakıroğlu, R., Yaşar, N., Özmen, R., Günay, M. 2019. Al2014 Alüminyum Alaşımının Delinmesinde İtme Kuvvetinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi, El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt. 6(1), s. 193-199. <https://doi.org/10.31202/ecjse.449701>.
- [10] Navaneethakrishnan, G., Sureshkumar, B., Palanisamy, R., Bajaj, M., Zawbaa, H. M., Kamel, S. 2022. Effect Of Cryogenic Treatment On Drill Tool For Enhancing Metal Cutting Operation Of Aluminium Alloy IS737.Gr19000. Journal of Materials Research and Technology, Cilt. 18, s. 1488-1501. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.069>.
- [11] Yaşar, N. 2019. Thrust Force Modelling And Surface Roughness Optimization In Drilling Of AA-7075: FEM and GRA, Journal of Mechanical Science and Technology, Cilt. 33(10), s. 4771-4781. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0918-5>.
- [12] Demir, Z., Adıyaman, O., Yakut, R. 2017. A7075-T651 Alaşımının Sürtünmeli Delinmesinde Ön-Delik Çap ve Derinliğinin Yüzey Pürüzlülüğüne Ve Kovanın Geometrik Boyutlarına Etkisinin Araştırılması, Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, Cilt. 7(2), s. 228-240.
- [13] Aamir, M., Giasin, K., Tolouei-Rad, M., Vafadar, A. 2020. A review: Drilling Performance And Hole Quality Of Aluminium Alloys For Aerospace Applications, Journal of Materials Research and Technology, Cilt. 9(6), s. 12484-12500. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.003>.
- [14] Haddag, B., Atlati, S., Nouari, M., Moufki, A. 2016. Dry Machining Aeronautical Aluminum Alloy AA2024-T351: Analysis Of Cutting Forces, Chip Segmentation And Built-Up Edge Formation, Metals, Cilt. 6(9), s.197-210. <https://doi.org/10.3390/met6090197>.
- [15] Taylan, D. 2009. Taguchi Deney Tasarımı Uygulaması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 73s, Isparta.
- [16] Murat D., Ensarioğlu C., Gürsakal N., Oral A., Çakır M.C. 2018. Sert Malzemelerin Tornalanmasında Takım Aşınmasının Tepki Yüzeyi Metodolojisi ile İncelenmesi, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Cilt. 33(4), s. 1299-1308. <https://doi.org/10.17341/gazimmf.416427>.
- [17] Özsoy N. 2022. Prediction And Optimization Of Thrust Force During The Drilling Of AISI 2080 Steel, Materials Testing, Cilt. 64(4), s. 602-609. <https://doi.org/10.1515/mt-2021-2098>.
- [18] Hazir E., Ozcan T. 2018. Response Surface Methodology Integrated With Desirability Function And Genetic Algorithm Approach For The Optimisation Of CNC Machining Parameters, Arabian Journal for Science and Engineering, Cilt. 44, s. 2795-2809. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3559-6>.



RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALASI

## Adjustable Friction Force of Elastic Post via Regulating Internal Cavity Pressure

### Kavite Boşluk Basıncını Düzenleyerek Elastik Çubuğun Ayarlanabilir Sürtünme Kuvveti

Turgay Eray 

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Aydın Adnan Menderes University, Efeler, Aydın, TÜRKİYE

Corresponding Author / Sorumlu Yazar\*: turgay.eray@adu.edu.tr

#### Abstract

The objective of this study is to investigate and obtain an adjustable friction force between an elastic polymeric post with cavity and a rigid, smooth, flat surface. Elastic cylindrical posts made of polymers are generally used as surface texturing components. In this study, the friction force of the elastic cylindrical posts with a flat tip in contact with a smooth and rigid surface was adjusted by a pneumatic-based actuation system. Finite-element based simulation was performed to adjust the friction force of the cylindrical posts by pressurizing the inner cavity of the posts. The frictional contact between the elastic posts and the counter rigid surface was modeled using the Amontons-Coulomb friction law, neglecting the adhesive contribution. The friction force amplitude was calculated with different cavity dimensions of the elastic posts and different cavity pressure values. The results show that the presence of an internal cavity reduces the friction force, and the cavity diameter has more influence on the reduction of the friction force than the cavity height. In conclusion, regulating the cavity pressure was shown to be an effective method of adjusting the friction force.

**Keywords:** Friction, Adjustable Friction, Elastic Post, Pressurized Cavity, Bending Rigidity

#### Öz

Bu çalışmanın amacı, polimerik malzemeden yapılmış kavite içeren elastik bir çubuk ile sert, pürüzsüz, düz bir yüzey arasında ayarlanabilir bir sürtünme kuvvetinin araştırılması ve elde edilmesidir. Polimerlerden yapılan elastik silindirik çubuklar genellikle yüzey desenleme bileşeni olarak kullanılır. Bu çalışmada, düz ve rijit bir yüzeyle temas halinde olan düz uçlu elastik silindirik çubukların sürtünme kuvveti pnömatik tabanlı eyleyici sistemi ile ayarlanmıştır. Silindirik çubukların sürtünme kuvvetini çubukların iç kaviteye basınç uygulayarak ayarlamak için sonlu elemanlar tabanlı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Elastik çubuklar ile karşıt rijit yüzey arasındaki sürtünme kuvveti, adeziv katkısı ihmal edilerek Amontons-Coulomb Sürtünme Kanunu kullanılarak modellenmiştir. Sürtünme kuvveti genliği, elastik çubukların farklı kavite boyutları ve farklı kavite basınç değerleri ile hesaplanmıştır. Bulgular; kaviteye sahip olmanın sürtünme kuvvetini azalttığını, kavite çapının sürtünme kuvvetinin azalması üzerinde kavite uzunluğundan daha fazla etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, kavite içindeki basıncı düzenlemenin sürtünme kuvvetini ayarlamak için etkili bir yöntem olduğu gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sürtünme, Ayarlanabilir Sürtünme, Elastik Çubuk, Basıncılı Kavite, Eğilme Rijitliği

#### 1. Introduction

Adjustable contact forces have been in favor for engineering applications, where the contact forces can be altered by modifying the contacting surfaces. One example of the surface modification is surface texturing [1–7]. Depending on the material of the surfaces, this method can be achieved by coating, molding, classical machining, laser fabrication, and soft lithography techniques. For soft contact with relatively low Young's modulus (~3 MPa), elastic posts are the most used structural component to texture the surfaces, where changing the structural parameters of elastic posts leads to changing the contact forces [8–12]. By using elastic posts mainly made of polymeric material such as Polydimethylsiloxane, contact parameters (contact pressure, contact forces, contact area etc.) are distributed to these elastic posts. This effect is called contact splitting [13]. Therefore, different structural parameters of elastic posts yield different contact parameters. Thus, playing

with the elastic posts physical and geometrical parameters such as dimension, material etc. results in an adjustable contact condition. This can be called a passive tuning strategy to adjust the contact parameters. However, it is important to emphasize that after the elastic posts are manufactured, it would be very difficult to modify the structural and geometrical parameters of the posts to adjust the contact parameters without external actuation. Furthermore, it is necessary to provide a possible external actuation mechanism to be able to alter the contact parameters using elastic posts. In this case, the elastic posts should be designed and manufactured in accordance with the external actuation system.

The friction force of elastic posts in contact with a smooth rigid body depends on the bending rigidity of the posts. In addition, it has been shown that friction force amplitude can be approximately calculated by using bending and axial rigidity of the posts based on the assumption that the contact is partitioned

into stiff components [14–16]. Furthermore, the friction force of elastic posts in contact with a smooth rigid body can also be altered by actively changing the dimensions of the posts (effective height and orientation of the post tip with respect to the friction direction) [17]. Here, changing the effective height and tip orientation modifies the bending rigidity of the posts. Therefore, modifying the bending rigidity of elastic posts would lead to an adjustable friction force between the elastic posts and smooth rigid body. The bending rigidity of mechanical systems can be modified by using two main methods: 1- Playing with the modulus of elasticity by making a composite material with two different materials [18–20]; 2- External actuation mechanism such as pneumatic [21], which is a simple way to modify the bending rigidity of the elastic posts. In addition, to provide pneumatic actuation, the elastic component must have some kind of internal structure [21–25], where air could be supplied. Related previous works have not investigated the effect of the internal structure on the friction of elastic posts. Therefore, it is necessary to investigate the effect of the internal structure dimension on the friction force of elastic posts in contact with a smooth rigid body.

In this study, the friction force of elastic posts in contact with a smooth rigid body was investigated by using a finite-element based engineering program. The elastic posts have an internal cavity to which pressurized air could be supplied, where the effect of internal cavity dimension and cavity pressure on the friction force amplitude was investigated. In section two,

materials and method are described in detail. Section three presents the results and discussion. Finally, in section four, the conclusion is given.

**2. Materials and Methods**

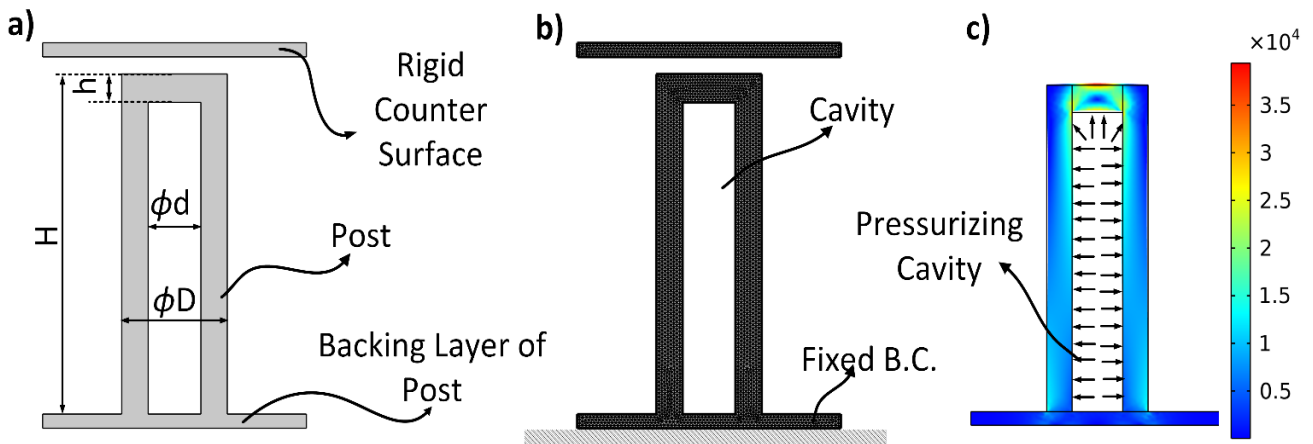
The frictional dynamics between an elastic cylindrical post and a rigid smooth and flat surface was simulated in a finite-element based engineering program (COMSOL Multiphysics 5.3a). A two-dimensional (2D) structural model of the posts was constructed in the software. The friction law governing the frictional motion between the elastic posts and the rigid counter surface was modelled by using Amontons-Coulomb friction law with a single coefficient. In another study, this friction model between an elastic post and a rigid, flat body with a single coefficient were shown to be in agreement with the experimental results in [14,20]. The same procedure was adopted in this study.

**2.1. Structure of the posts and simulation parameters**

In the simulations, the elastic posts have same diameter and height. Different diameters and different lengths are considered for the internal cavity in the posts. The friction force between the posts and the rigid counter surface was investigated under different internal cavity pressures by keeping the diameter and height of the inner cavity constant. The simulation sets formed by varying the constructional parameters of the posts and the simulation conditions are given in Table 1 and shown in Figure 1. Here, D is post diameter, H is post height, d is cavity diameter, and h is layer thickness over the cavity.

**Table 1.** The simulation sets and structural parameters of the posts used in the simulation sets.

Sets	R:D/2	H	d/R	h	P
Set-h (Cavity height effect)	4 mm	24 mm	1	0.2:0.2:4 mm	0 bar
Set-d (Cavity diameter effect)	4 mm	24 mm	(0.2:0.2:1)	1 mm	0 bar
Set-P (Cavity pressure effect)	4 mm	24 mm	1	2 mm	0.5:0.1:1 bar



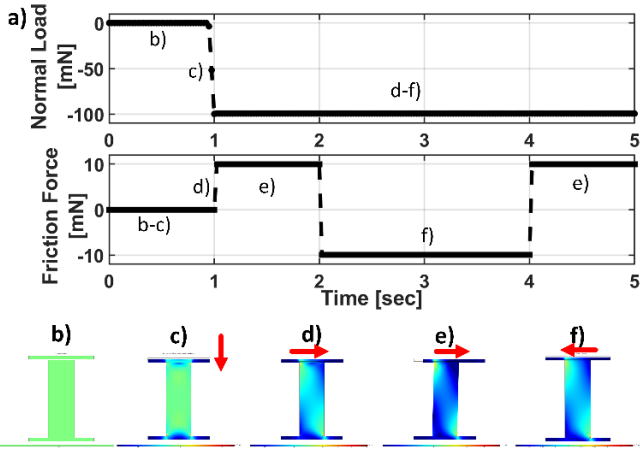
**Figure 1.** a) Design parameters of the elastic posts, b) Structure of the mesh in the simulations, c) Pressurized state and the resulting von Mises stress in Pa

**2.1.1. Physical parameters in the simulations and the simulation procedure**

The elastic material of the posts is Polymethylsiloxane (PDMS), which has a Young Modulus of 2 MPa. The Young’s Modulus of the

rigid counter surface is chosen to be 70 GPa. The viscoelastic effects of the PDMS and the counter surface are neglected. The friction model between the post and the counter surface is defined by a single friction coefficient, which is 0.3. By keeping this value constant, only the structural effects of the posts and the

cavity pressure effect on the friction force were examined. A typical time-contact force result and the simulation stages on the finite-element based engineering software are depicted in Figure 2.



**Figure 2.** Typical simulation result: a) Time-normal and time-friction force results are presented, revealing the stages of frictional motion. During these stages, the counter surface moves in the direction indicated by the red arrow. b) Initially, there is no contact between the post and the counter surface. c) Subsequently, full contact is established under a certain preload value. d) At this point, the counter surface is laterally displaced, and the post and the counter surface are sticking. e) Once the friction force reaches the threshold value [26], the post transitions to full-sliding motion. f) Finally, the counter surface is moved in the opposite direction to obtain the friction force-displacement loop

**2.1.2. Mesh convergency study**

The Comsol Multiphysics software offers different predefined mesh sizes from extremely coarse to extremely fine. Each predefined mesh automatically generates the mesh model of the structural components, resulting in a different number of boundary and domain elements, and degrees of freedom. In our study, six different predefined mesh sizes are selected and

**Table 2.** Mesh converge study for the constructed simulation model.

Predefined Mesh Sizes (M.S.)	Coarse	Normal	Fine	Finer	Extra Fine	Extremely Fine (E.F)
Domain Element Number	144	244	352	732	2254	8594
Boundary Element Number	88	102	112	156	284	566
Number of degrees of freedom	781	1249	1713	3357	9785	35889
Friction Force [mN]	9.9699	9.9684	9.9539	9.9524	9.9300	9.9271
Error (%) in Friction Force	-%004.360	-%004.311	-%002.700	-%002.549	-%000.292	-

**2.1.4. Simulation procedure for the frictional motion with pressurized cavity of the posts**

The effect of the cavity pressure on the friction force was investigated in two configurations. In the first configuration, there is no contact between the post and the counter surface. The cavity of the posts is pressurized prior the contact. In this configuration, the normal force between the post and the counter surface can be obtained at the desired value. This gives a friction force result with pressurized cavity in pre-contact configuration. In the second configuration, the posts and the counter surface are

compared with the results of the extremely fine mesh size for friction force magnitudes in the sliding regime (e-f in Figure 2). The relative error is defined as  $Err=1000*(E.F-M.S)/E.F$ . The results are shown in Table 2. From the results, the most accurate solution is the extremely fine mesh study. However, due to the increased number of degrees of freedom and the closeness of the results to the extremely fine mesh, the extra fine mesh is selected for further simulations. For the selected mesh, the relative error is around %0.02.

**2.1.3. Simulation procedure for the frictional motion without pressurizing cavity of the posts**

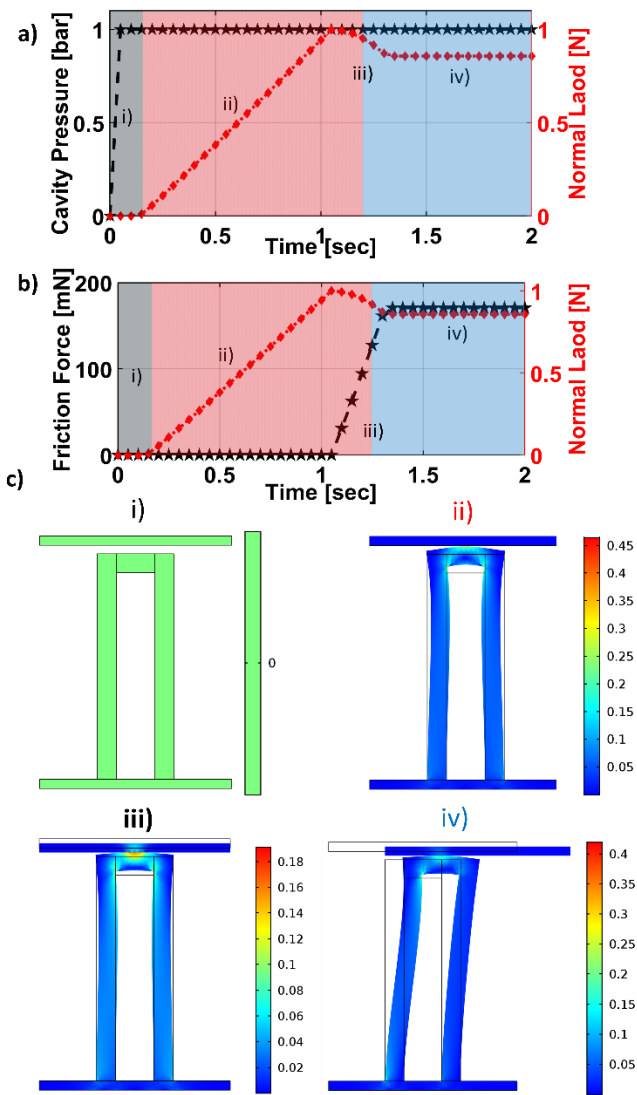
The stages of the frictional motion between the post and the counter surface for the frictional motion given in the sets (Set-h & Set-d) are as follows:

- ✓ There is no contact between the opposite surface and the post as depicted in Figure 2(b).
- ✓ The post is compressed by applying uniaxial to the counter surface. Then, the full contact is obtained between the post and the counter surface with a desired preload value as shown in Figure 2(c). The post is fixed from its backing layer. Here, the preload value between the post and the counter surface is selected as  $F_p=0.10, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$  N.
- ✓ After the desired preload value is achieved between the counter surface and the post, the counter surface moves in the lateral direction, and hence friction is attained between the post and the counter surface as depicted in Figure 2(d).
- ✓ When the friction force between the post and the counter surface reaches the threshold value [26], the post goes into full-sliding motion. The normal and friction forces remain constant during the full sliding motion of the post as shown in Figure 2(e). The friction force is at its maximum value at this stage, and this value is considered in the next sections.
- ✓ The friction force-displacement loop is obtained by moving the counter surface in the opposite direction as given in Figure 2(f).

in full contact. Then, the cavity of the post is pressurized. However, with the cavity pressurized, the normal force may differ from the desired preload value. This configuration is also divided into two parts. The first one is to obtain the friction force with the pressure values specified in Table 1, and the second is to attain the friction force by applying pressure to cavity for the desired normal load. In the first configuration, the post and the counter surface are not in contact. The post is pressurized prior to contact. The simulation protocol is as follows:



- ✓ There is no contact between the post and the counter surface. At this stage, the cavity of the post is pressurized as depicted in Figure 3(c-ii).
- ✓ The post is compressed by the counter surface until the desired preload value is achieved between the post and the counter surface. Meanwhile, the pressure in the post cavity is kept constant as shown in Figure 3(c-iii).
- ✓ As shown in Figure 3(c-ii), the desired preload value is attained. The counter surface is moved laterally to obtain friction force. A typical time-normal and friction force, time-cavity pressure results are shown in Figure 3.

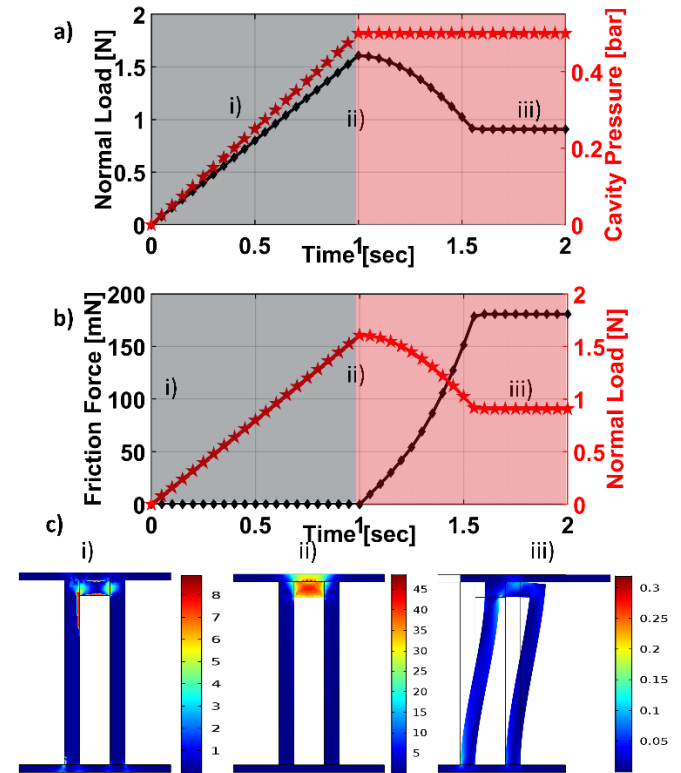


**Figure 3.** Typical results with the pressurized cavity prior to contact between the post and the counter surface; a) Cavity pressure, normal load, b) Friction force-normal load; where the black line represents the cavity pressure and the friction force, the red line represents the normal force value. The preload value is 1 N, and the cavity pressure value is 1 bar. c) The steps in the simulations; i) There is no contact between the post and the counter surface, ii) The cavity of the post is pressurized to a desired value, iii) The post is compressed by the counter surface until the normal force reaches the desired preload value, iv) The friction force is obtained by moving the counter surface in the lateral direction. The legend shows the von Mises stress in MPa

In the second configuration, there is a contact between the post and the counter surface, the contact force is approximately 0 N.

The cavity of the post is pressurized and as in the other stages, when the desired pressure value is reached, the counter surface moves in the lateral direction. Hence, the friction force is obtained. There are two key points to mention. These are 1) the deviation of the normal load value from the desired preload value due to the desired pressurized cavity, 2) the adjustment of the cavity pressure to obtain the desired preload value. The typical result and the phases of the simulation are given in Figure 4. The simulation procedure is as follows:

- ✓ The counter surface is in contact with the post. The normal force is approximately 0 N.
- ✓ By restricting the movement of the counter surface in direction parallel to the cavity pressurized direction, it is ensured that there is a contact between the counter surface and the post at every simulation stages.
- ✓ The cavity of the post is pressurized. Because of the restricted movement of the counter surface, a normal force is achieved between the post and the counter surface as depicted in Figure 4, 1st Phase.
- ✓ When the cavity pressure reaches the desired maximum pressure value, the maximum normal force value is obtained between the counter surface and the post, End of 1st Phase. After this step, the counter surface moves laterally. Hence, frictional motion is obtained, 2nd Phase. During this motion, the cavity pressure is kept constant.

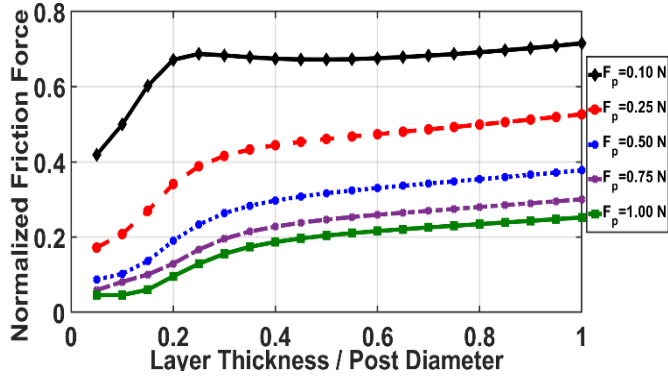


**Figure 4.** The effect of cavity pressurization on the friction force when the post is in contact with the counter surface. a) Typical normal load-pressure-time and b) friction force-normal load-time results and c) the phases in the simulation. i) The cavity of the post is pressurized and at this time, the normal load between the post and the counter surface increases, ii) The maximum pressure value is reached, and the maximum normal load is obtained. iii) The friction force is obtained by giving lateral motion to the counter surface

### 3. Results and Discussion

### 3.1. Effect of layer thickness over the cavity on the friction force

This section presents the results of the effect of the layer thickness over the post cavity on the friction force amplitude are given. The friction force amplitudes were obtained according to five different preload force values ( $F_p$ : 0.10, 0.25, 0.50, 0.75 and 1.00 N). The friction force results were normalized with respect to the results of the homogenous post (post without cavity). The results are given in Figure 5.



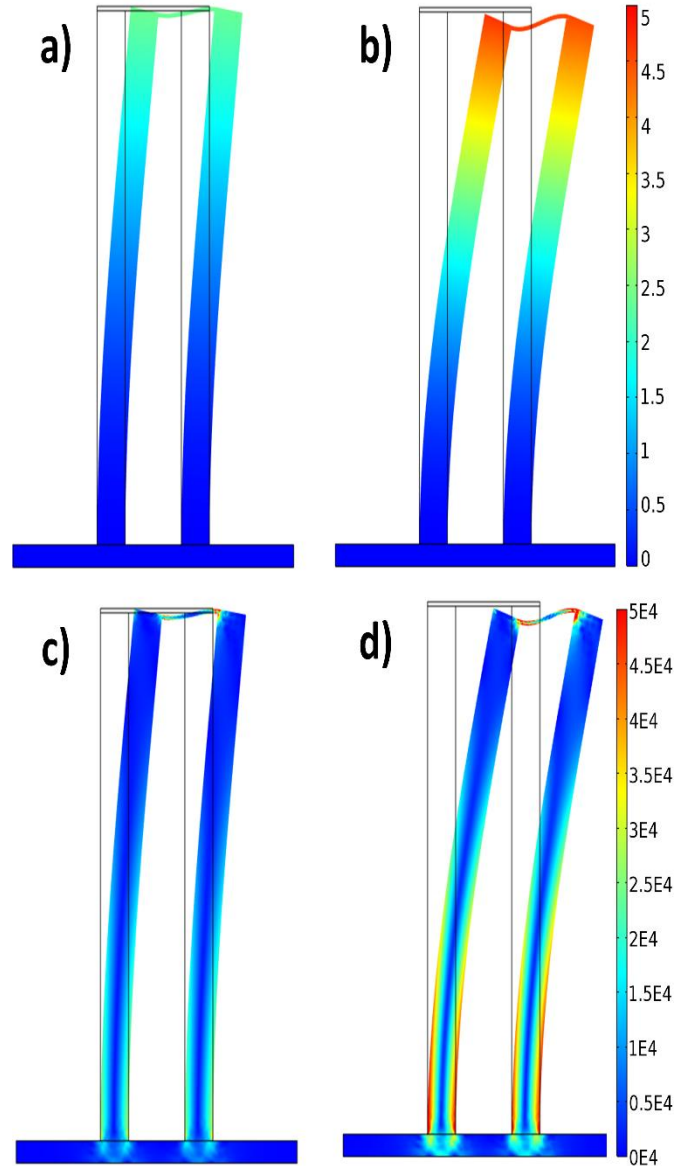
**Figure 5.** The effect of thickness of the layer on the normalized friction force amplitude obtained under five different preload values (0.1, 0.25, 0.5, 0.75 and 1 N)

As the diameter of the post cavity remains constant and the thickness of the layer over the cavity increases, the frictional force increases. The characteristic of the increase in friction force is the same for all preload values. The change in friction force is linear up to a layer thickness of 0.2 mm over the cavity. After the 0.2 value, the change in frictional force is different for different preload values. This phenomenon can be explained by the fact that when the layer thickness is thin, it behaves like a thin sheet between the post sides. In this case, the elastic deformation of the post tip changes with the layer thickness. The characteristic of decreasing amount of elastic deformation changes with increasing layer thickness. Thus, the effect of different layer thickness on different change of friction force can be explained in this way. Accordingly, Figure 6 and Figure 7 show the elastic deformation and von Mises stress values of the post with the same thin film layer thickness at different preload values, and at the same preload value (1.00 N) but the post with different thin film layer thickness, respectively. As the layer thickness over the cavity increases, the elastic deformation in the layer changes and the amplitude of the normal force between the post and the counter surface changes accordingly.

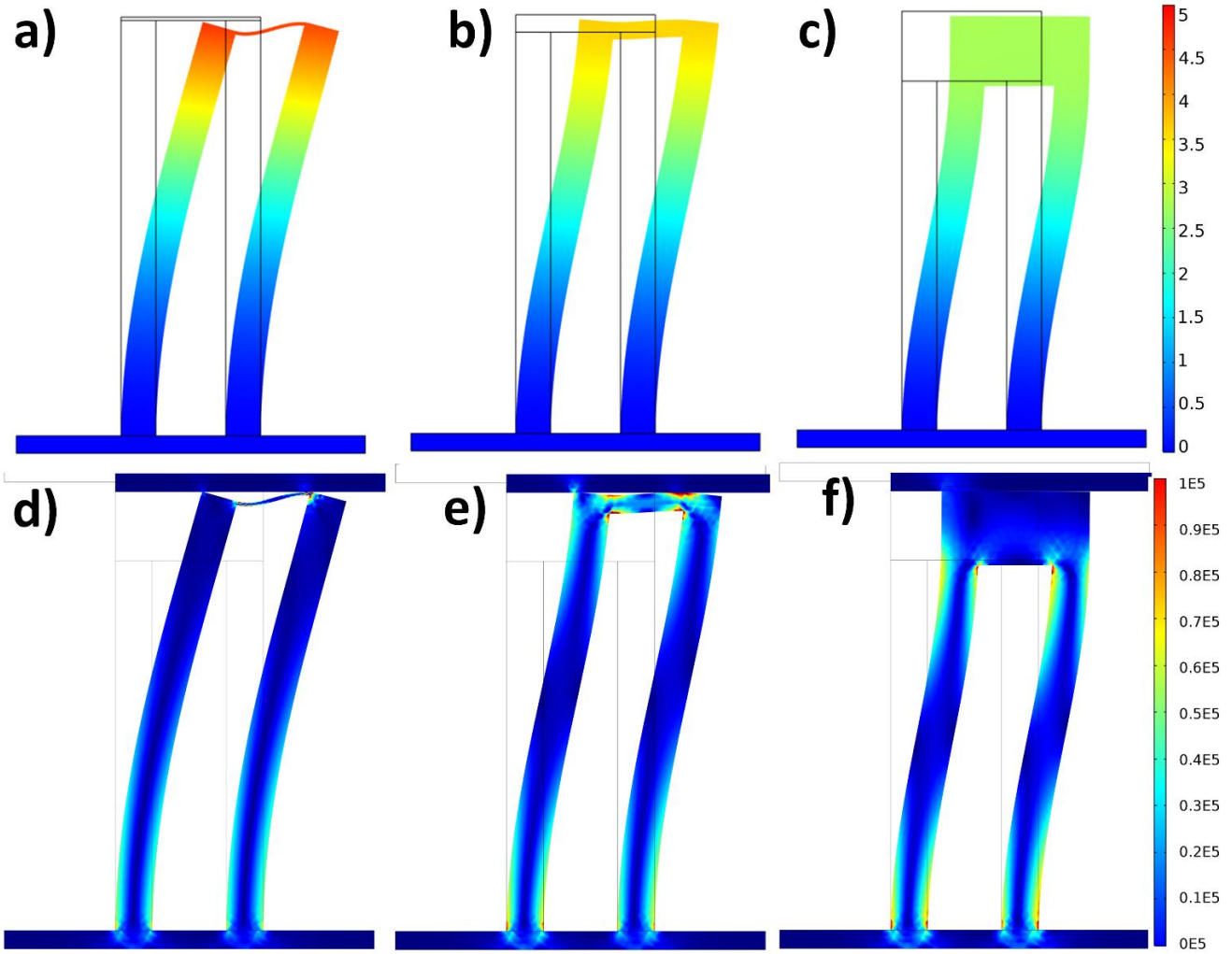
Since the friction force amplitude is directly related to the contact area at the contact interface [27], alteration of the contact area with varying thickness of the thin film over the cavity yields different friction force. The normal load is the force exerted by the contact pressure over the contact area. The contact area was approximated using the relationship between the normal load at the contact interface and the maximum contact pressure. The normal force and maximum contact pressure for the post with a film layer thickness of 0.2 mm and the variation of the contact area with the different layer thickness are shown in Figures 8 and 9, respectively.

Although the friction force increased with increasing the layer thickness over the cavity, the friction force value is still lower than that of the homogenous post (post without cavity). This phenomenon can be explained by different bending rigidity of the

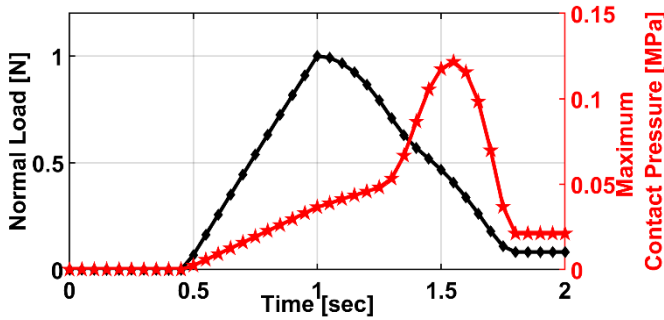
post in the lateral (shear) direction with different layer thickness. The bending rigidity of posts can be approximated by Hooke's law using the maximum deformation of the post for a given lateral force. In Figure 10, the variation of the bending rigidity of the post with respect to the different layer thickness over the cavity is given by normalizing with respect to the bending rigidity of the homogenous post. The bending rigidity of the post increases as layer thickness increases. The change characteristic of the bending rigidity is the same as the change of the friction force characteristic as shown in Figure 10. The lower friction force of the posts due to the cavity can be related to the decrement of the bending rigidity, since the friction force of the posts is directly related to the bending of the post [14,15].



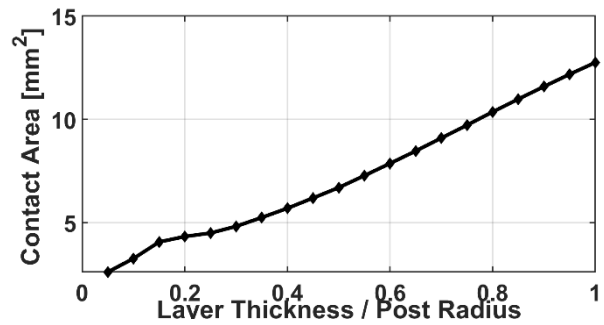
**Figure 6.** The simulation results, when the cavity diameter of the post is 4 mm and the thickness of the layer over the cavity is 0.2 mm, the elastic deformation and the von Mises stress when the preload value is a-c) 0.10 N, b-d) 1.00 N, respectively. The legend is in mm in a-b) and in Pa in c-d)



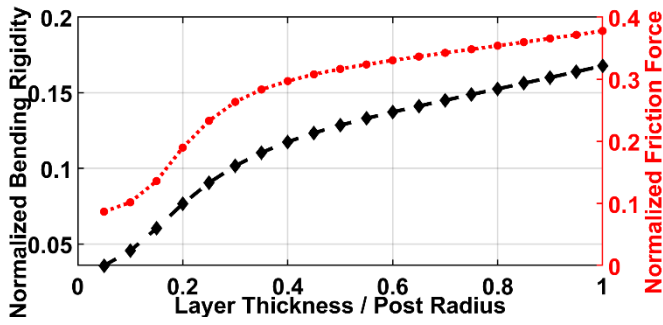
**Figure 7.** Under the same preload value (1 N), the elastic of deformation and von Mises stress obtained for the posts with the same cavity diameter and different layer thickness values over the cavity, respectively. Layer thickness is a-d) 0.2 mm, b-e) 1 mm, and c-f) 4 mm. The legend is in mm in a-b-c) and in Pa in d-e-f)



**Figure 8.** Time evaluation of normal force and contact pressure in the frictional motion of the post with a layer thickness of 0.2 mm and a cavity diameter of 4 mm under a preload of 1.00 N. Here, the black line and the red line represent the normal force and the contact pressure, respectively. The contact area is calculated by dividing the normal load by the maximum contact pressure



**Figure 9.** Variation of the approximate contact area with respect to the layer thickness over the cavity in the posts containing different layer thicknesses with a cavity diameter of 4 mm

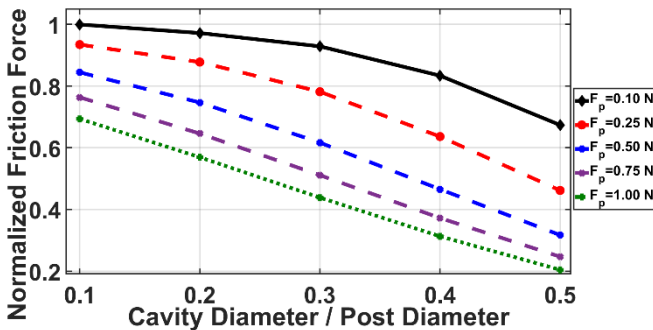


**Figure 10.** The effect of the layer thickness over the cavity on the bending rigidity of the post normalized with the bending rigidity of the homogenous post, and the relation between the change of friction force and the change of bending rigidity of the post

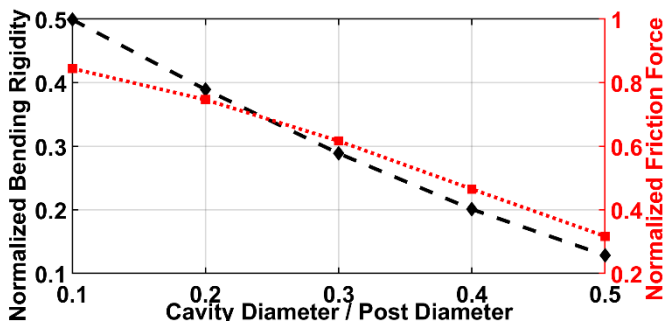
**3.2. Effect of cavity diameter on the friction Force**

The effect of cavity diameter on friction force is achieved by maintaining the layer thickness over the cavity of the posts constant. The amplitude of friction force is normalized with respect to the value of the homogenous post. Figure 11 shows the relationship between the friction force value and cavity diameter. As the cavity diameter increases, the friction force decreases linearly. The maximum decline reaches up to 80%.

The reduction in bending rigidity is caused by the presence of a cavity. Additionally, it should be noted that the diameter of the cavity results in a greater reduction in friction force amplitude compared to the thickness of the layer. This can be explained by the cavity diameter's effect on the posts' bending rigidity at the fourth order, while the layer thickness has a third order effect. Figure 12 illustrates alterations in the friction force and bending rigidity of the post.



**Figure 11.** The effect of cavity diameter on the normalized friction force amplitude obtained under five different preload values (0.1, 0.25, 0.5, 0.75 and 1 N)



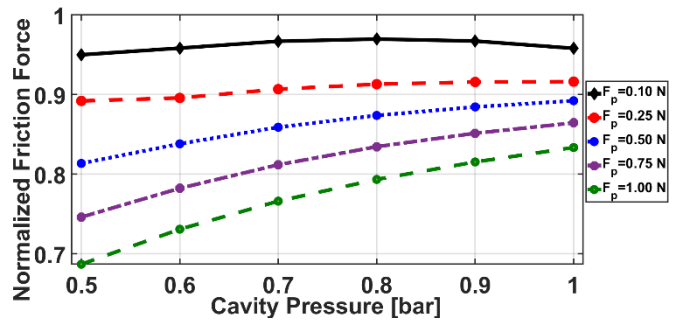
**Figure 12.** The effect of the cavity diameter on the bending rigidity of the post normalized with the bending rigidity of the homogenous post, and the relation between the change of friction force and the change of bending rigidity of the post

**3.3. Effect of cavity pressure on the friction force**

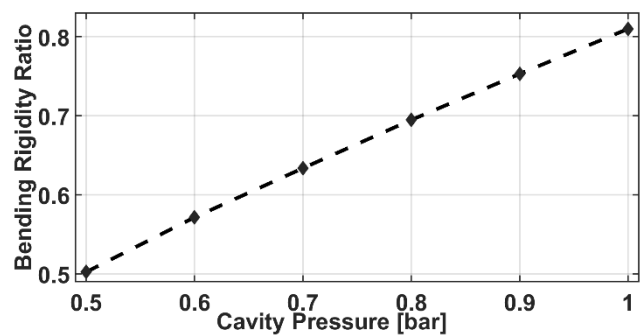
In a post with a constant cavity diameter and layer thickness over, the variation of friction force amplitude was investigated by pressurizing the cavity. The friction force amplitude was normalized to the friction force amplitude of the homogenous post. The cavity was pressurized in two instances. 1) The cavity was pressurized after the desired preload value was achieved through static contact. 2) The cavity was pressurized whilst the post and counter surface were in contact with a preload value of approximately 0 N.

**3.3.1. Pressurizing the cavity before the contact between the post and the counter surface**

The inner cavity of the post is pressurized with amplitudes of 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 and 1 bar. Figure 13 illustrates the fluctuation of friction force amplitude accompanying the post's cavity pressure. As the cavity pressure amplifies, so does the friction force amplitude; it varies almost linearly with the cavity pressure amplitude. Increasing cavity pressure provokes linear changes in the post's bending rigidity. The bending rigidity of the post is normalized in comparison to the homogenous post, and its variation with pressure is displayed in Figure 14. The linear variation of post bending rigidity with cavity pressure can account for the almost linear variation in friction force amplitude. It is worth noting that there is no contact between the posts and the counter surface when computing the bending rigidity of the posts.



**Figure 13.** The effect of the post cavity pressure on the friction force amplitude when the cavity was pressurized prior to contact



**Figure 14.** Effect of cavity pressure on the normalized bending rigidity of post

**3.3.2. Pressurizing the cavity after the contact between the post and the counter surface**

This study examined the effect of cavity pressure amplitude on friction force when the post and counter surface are in contact. To achieve this, the counter surface's movement in the normal direction during cavity pressurization is restricted. Pressure values of 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 and 1 bar were selected for the initial stage of the investigation. In the second scenario, we determined the cavity pressure amplitudes corresponding to the



desired preload force values. The cavity was pressurized using these pressure values and the friction force was calculated with the desired preload force value. The reason for the two scenarios is because the preload value differs due to cavity pressure. Figure 15 illustrates the preload value due to different cavity pressures in these scenarios. The variation of the friction force amplitude with cavity pressure after contact in two simulations is shown in Figure 16. The friction force escalated with increasing cavity pressure, mimicking the results of the pressurized cavity before the contact.

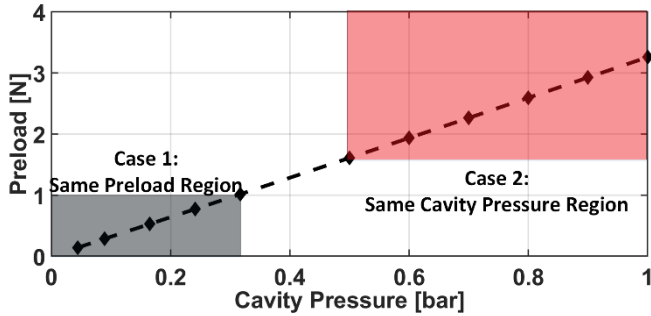


Figure 15. Variation of preload force value with the cavity pressure

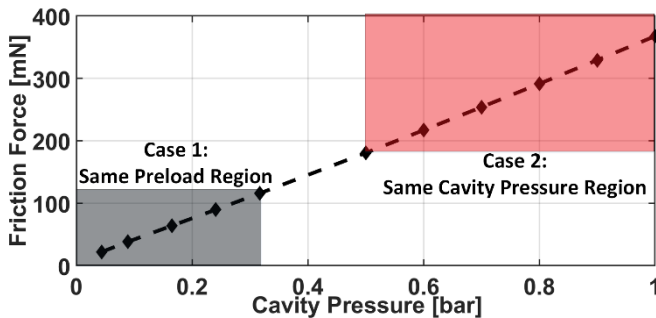


Figure 16. The effect of the cavity pressure on the friction force amplitude when the post is in contact with the counter surface

**3.4. Adjusting the friction force by regulating cavity pressure**

In the simulation studies conducted thus far, investigations have been made into the effects of the structural dimensions of the posts' cavities and cavity pressures on friction force amplitude. One aim of this study is to achieve an adjustable friction force between elastic posts and a flat and rigid body by regulating the post's cavity pressure. The variation in friction force amplitude is achieved by changing the cavity pressure of the post during full-slip motion and is shown in Figure 17, indicating the amplitude of the cavity pressure and its relationship with the friction force. The results demonstrate that the friction force adjusts almost linearly to the pressure change occurring during contact. The variation in the amplitude of friction force over time follows a similar pattern to the variation in cavity pressure over time. Therefore, the simulations have demonstrated that regulating cavity pressure can manipulate the amplitude of friction force.

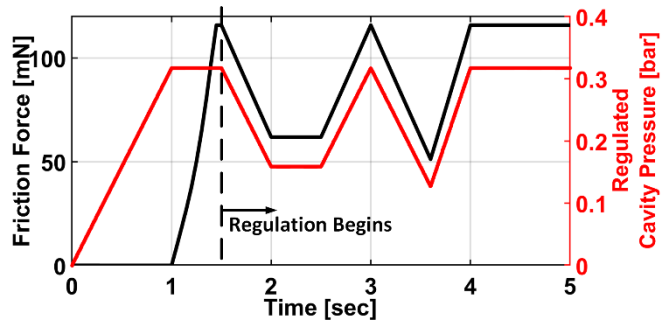


Figure 17. The effect of the cavity pressure on the friction force amplitude when the post is in contact with the counter surface

**4. Conclusion**

In this study, the friction dynamics of elastic cylindrical posts with cavity in contact with a flat, smooth, and rigid body were simulated in a finite-element based engineering program. The friction force amplitudes were calculated and the variation of the friction force with the structural parameters of the post cavity and the cavity pressure value of the post were obtained. The adjustable friction force by regulating the cavity pressure amplitude is shown in the simulations. The presence of a cavity reduces the friction force, with the cavity diameter having a greater influence on the reduction of the frictional force. Increasing the cavity pressure increases the friction force due to the increase in bending rigidity. Regulating the cavity pressure is shown to be an effective method of adjusting the friction force of an elastic post in contact with a rigid, smooth, flat surface.

**Ethics committee approval and conflict of interest statement**

This article does not require ethics committee approval. This article has no conflicts of interest with any individual or institution.

**Acknowledgment**

This work was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under grant no. 118M302.

**References**

- [1] Wang, Z.W., Chen, M.W., Wu, J.W., Zheng, H.H., Zheng, X.F., 2010. A review of surface texture of tribological interfaces, In *Applied Mechanics and Materials*, Cilt. 37, s. 41-45. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.37-38.41
- [2] Varenberg, M., Gorb, S.N., 2009. Hexagonal surface micropattern for dry and wet friction, *Advanced Materials*, Cilt. 21(4), s. 483-486. DOI: 10.1002/adma.200802734
- [3] Etsion, I. 2004. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing, *Tribology letters*, Cilt. 17(4), s. 733-737. DOI: 10.1007/s11249-004-8081-1
- [4] Etsion, I. 2005. State of the art in laser surface texturing, *Journal of Tribology*, Cilt. 127(1), s. 248-253. DOI: 10.1115/1.1828070
- [5] Abdel-Aal, H. A. 2016. Functional surfaces for tribological applications: inspiration and design, *Surface Topography: Metrology and Properties*, Cilt. 4(4), s. 043001. DOI 10.1088/2051-672X/4/4/043001
- [6] Mohd Nasir, F.F., Ghani, J.A., Zamri, W.F.H.W., Kasim S. M. 2019. State-of-the-art surface texturing and methods for tribological performance. *World Review of Science, Technology and Sustainable Development*, Cilt. 15, s. 330-357. DOI: 10.1504/WRSTSD.2019.104096
- [7] Gachot, C., Rosenkranz, A., Hsu, S., Costa, H. 2017. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement, *Wear*, Cilt. 372, s. 21-41. DOI: 10.1016/j.wear.2016.11.020
- [8] He, B., Chen, W., Wang, Q. J. 2008. Surface texture effect on friction of a microtextured poly (dimethylsiloxane)(PDMS), *Tribology Letters*, Cilt. 31(3), s. 187. DOI: 10.1007/s11249-008-9351-0
- [9] Murarash, B., Itovich, Y., Varenberg, M. 2011. Tuning elastomer friction by hexagonal surface patterning, *Soft Matter*, Cilt. 7(12), s. 5553-5557. DOI: 10.1039/C1SM00015B



- [10] Degrandi-Contraires, E., Poulard, C., Restagno, F., Léger, L. 2012. Sliding friction at soft micropatterned elastomer interfaces, *Faraday discussions*, Cilt. 156(1), s. 255–265. DOI: 10.1039/C2FD00121G
- [11] Greiner, C., Merz, T., Braun, D., Codrignani, A., Magagnato, F. 2015. Optimum dimple diameter for friction reduction with laser surface texturing: the effect of velocity gradient, *Surface Topography: Metrology and Properties*, Cilt. 3(4), s. 044001. DOI: 10.1088/2051-672X/3/4/044001
- [12] Greiner, C., Schäfer, M. 2015. Bio-inspired scale-like surface textures and their tribological properties, *Bioinspiration & biomimetics*, Cilt. 10(4), s. 044001. DOI: 10.1088/1748-3190/10/4/044001
- [13] Greiner, C., Schafer, M., Popp, U., Gumbsch, P. 2014. Contact splitting and the effect of dimple depth on static friction of textured surfaces, *ACS Applied Materials & Interfaces*, Cilt. 6(11), s. 7986–7990. DOI: 10.1021/am500879m
- [14] Eray, T., Sümer, B., Koc, I. M. 2016. Analytical and experimental analysis on frictional dynamics of a single elastomeric pillar, *Tribology International*, Cilt. 100, s. 293–305. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.02.013
- [15] Koc, I. M., Eray, T. 2018. Modeling frictional dynamics of a visco-elastic pillar rubbed on a smooth surface, *Tribology International*, Cilt. 127, s. 187–199. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.05.041
- [16] Popov, V.L. 2013. Method of reduction of dimensionality in contact and friction mechanics: A linkage between micro and macro scales, *Friction*, Cilt. 1(1), s. 41–62. DOI: 10.1007/s40544-013-0005-3
- [17] Marvi, H., Han, Y., Sitti, M. 2015. Actively controlled fibrillar friction surfaces, *Applied Physics Letters*, Cilt. 106(5), s. 051602. DOI: 10.1063/1.4907255
- [18] Eray, T., Koc, I. M., Sumer, B. 2019. Investigation of adhesion and friction of an isotropic composite pillar, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Cilt. 233(4), s. 520–531. DOI: 10.1177/1350650118774427
- [19] Tian, Y., Zhao, Z., Zaghi, G., Kim, Y., Zhang, D. and Maboudian, R. 2015. Tuning the friction characteristics of gecko-inspired polydimethylsiloxane micropillar arrays by embedding Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and SiO<sub>2</sub> particles, *ACS Applied Material & Interfaces*, Cilt. 7, s. 13232–13237. DOI: 10.1021/acsami.5b03301
- [20] Fischer, S.C., Levy, O., Kroner, E., Hensel, R., Karp, J.M. and Arzt, E. 2016. Bioinspired polydimethylsiloxane-based composites with high shear resistance against wet tissue, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, Cilt. 61, s. 87–95. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2016.01.014
- [21] Sharifi, S., Rux, C., Sparling, N., Wan, G., Mohammadi Nasab, A., Siddaiah, A., Menezes, P., Zhang, T. and Shan, W. 2021. Dynamically Tunable Friction via Subsurface Stiffness Modulation, *Frontiers in Robotics and AI*, Cilt. 8, s. 691789. DOI: 10.3389/frobt.2021.691789
- [22] Arul, E.P., Ghatak, A. 2012. Control of adhesion via internally pressurized subsurface microchannels, *Langmuir*, Cilt. 28, s. 4339–4345. DOI: 10.1021/la204618u
- [23] Prieto-López, L.O. and Williams, J.A., 2016. Using microfluidics to control soft adhesion. *Journal of adhesion science and Technology*, Cilt. 30(14), s. 1555–1573. DOI: 10.1080/01694243.2016.1155878
- [24] Mohammadi Nasab, A., Luo, A., Sharifi, S., Turner, K.T. and Shan, W., 2020. Switchable adhesion via subsurface pressure modulation. *ACS applied materials & interfaces*, Cilt. 12(24), s. 27717–27725. DOI: 10.1021/acsami.0c05367
- [25] Eray, T., 2022. Tunable adhesion of an elastic pillar by pressurizing inner cavity, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Cilt. 236(3), s. 541–551. DOI: 10.1177/135065012111018291
- [26] Maugis, D., 2013. *Contact, adhesion and rupture of elastic solids*, 1st edition. Springer Berlin, Heidelberg, 414s.
- [27] Carpick, R. W., Ogletree, D. F., Salmeron, M. 1997. Lateral stiffness: a new nanomechanical measurement for the determination of shear strengths with friction force microscopy, *Applied Physics Letters*, Cilt. 70(12), s. 1548–1550. DOI: 10.1063/1.118639



RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALASI

# Secure Communication Between Unmanned Aerial Vehicle and Ground Control Station

## İnsansız Hava Aracı ve Yer Kontrol İstasyonu Arasında Güvenli İletişim

Pınar Savaşürk<sup>1</sup>, İbrahim Atakan Kubilay<sup>\*2</sup>, Gökhan Dalkılıç<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yazılım Mühendisliği Bölümü, Kırklareli, TÜRKİYE

<sup>2,3</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Corresponding Author / Sorumlu Yazar \*: atakan.kubilay@deu.edu.tr

### Abstract

The main purpose of this article is to provide data transfer by providing secure communication with drones, which is a kind of unmanned aerial vehicle (UAV). In our study, without intervening hardware and software of the drone (most of the drones do not allow interference with their hardware and software), a security layer is added for data communication. In our study for adding this layer, Wemos D1 Mini, having wireless network module and cheap, was used. In the scope of the study, Wi-Fi modules are customized and converted into Access Point and Client forms. The message sent to the specialized modules is provided through the Mobile Application, which has been designed and implemented for this study. Thus, commands were transmitted in an encrypted form in the wireless data transmission environment. As a result, this concept has become a prototype that can be customized according to any specific drone having Wi-Fi communication.

**Keywords:** UAV secure communication, IoT secure communication, lightweight encryption

### Öz

Bu makalenin temel amacı, bir tür insansız hava aracı (İHA) olan dronlarla (uçangöz) güvenli iletişim sağlayarak veri aktarımı sağlamaktır. Çalışmamızda, dronun donanım ve yazılımına müdahale etmeden (birçok dron donanım ve yazılımına müdahale edilmesine izin vermez) veri aktarımında bir güvenlik katmanı eklenmiştir. Çalışmamızda bu katmanı eklemek için kablosuz ağ modülüne sahip ve maliyeti düşük olan Wemos D1 Mini kullanılmıştır. Çalışma kapsamında Wi-Fi modülleri özelleştirilmiş ve Erişim Noktası ve İstemci formlarına dönüştürülmüştür. Özelleştirilmiş modüllerine gönderilen mesaj, bu çalışma için tasarlanan ve geliştirilen Mobil Uygulama aracılığıyla sağlanmıştır. Böylece, komutlar kablosuz veri iletim ortamında şifrelenmiş bir biçimde iletilmiştir. Sonuç olarak, bu konsept, Wi-Fi iletişime sahip her türlü dron için özelleştirilebilen bir prototip haline gelmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İHA güvenli iletişim, IoT güvenli iletişim, düşük seviyeli şifreleme

## 1. Introduction

Security is essential for all structures. In particular, devices that communicate wirelessly need further protection. Basically, extra measures should be taken to ensure the control and safety of such devices. Ensuring both safety and control is very important. The biggest problem in achieving this control is that the transmitter and receiver cannot be accurately verified due to wireless transmission [1]. Especially drones that communicate wirelessly are exposed to security problems. The drone, which is controlled by any user, can be attacked, seized, or damaged. Hacking of drones is an important challenge, and a list of events outlined in [2] show that commandeering of commercial drones is quite common, and even military drones can be victim to outside attacks. Therefore, network security is a vital concept for safe drone operations.

Article [3] describes a Man-in-the-Middle (MitM) attack that can be used to control a drone from kilometers away. The same source has proposed various encryption schemes at chip and application levels as possible solutions for the problem, please see [4] for a more general review of network security problems of drones.

The main reason for the problem is that the data transmitted between the control station and the drone cannot be properly protected. In particular, the data transmitted clearly between this structure causes many problems. Because of these situations, there is a need for improvements in this area in order to ensure secure communication and to protect the transmitted data. In our study, the connection between the control station and the unmanned aerial vehicle (UAV) [5] was secured with additional hardware components such as the Wemos D1 Mini wireless fidelity (Wi-Fi) module. This study focuses on the UAV like DJI Tello Drone.

## 2. Related Works

The project area covers drones, a sub-class of unmanned aerial vehicles [6]. It is necessary to ensure the safe communication of these unmanned aerial vehicles. In this context [7] is a good guide. As mentioned in the article, unmanned aerial vehicles can be used in many areas and they may be exposed to many threats [8]. These attacks can sometimes take control of an unmanned aircraft, render it dysfunctional or disable and damage it. Under the control of malicious users, these devices can become very dangerous. It can even threaten a person's life. In this article, it is

stated that uses of unmanned aerial vehicles range from education to industry, from trade to defense [9]. It explains the deficits of unmanned aerial vehicles that communicate with wireless communication channels [6]. Radio waves, electromagnetic waves, and the communication channels they use to communicate are explained in the article. From this point of view, they have made improvements on how the wireless communication channels can be more secure [10]. In the article, attention has been paid to the communication network between the sender and the receiver. The most important points of how unmanned aerial vehicles are used, how much an attack can cause damage and developing possible solutions to the attacks are discussed.

As seen in article [11], attacks can be made to secure the drones. Models were made for attack types. Thus, possible threats were identified. The basis of the modeling is a controller that controls the drones with any application or device. The controller is connected to the drone via a wireless network. When the attacker who intercepts the connection intercepts the drone, the drone is out of control according to the legitimate user. Thus, the attacker has all the information and control of the drone. The major contribution of this article is to realize the gap between the controller and the drone. In all of the modeled attacks, the user is directly connected to the drone. Therefore, the attacker is trying to connect to the drone to capture the drone. Due to insufficient encryption in wireless networks [12], these attacks are often successful. For such attacks, a solution has been produced in our study.

In article [13], there is a drone in the given architecture. There is a control console that controls the drone. In general, the man in the middle attack between the controller console and the drone is described. A mechanism called xBee is placed in the ancestor to improve the mechanism that is likely to be exposed to this attack. In this way, the communication channel expected to be provided between the drone and the controller becomes gradual. In the architecture we designed, we provide 2 wireless network modules together. However, the module inserted in the discussed article [13] is only one. And the connection to it is made wirelessly. The architecture in the discussed article does not mention the cryptography structure to be used in the transmission of data. Advanced encryption standard (AES) encryption was used in the communication channel in our study. The use of number generators that would allow stream encryption on the Wemos D1 Mini is not useful. In addition, AES block cipher using strong, s-box and permutation embedded on the module is preferred. Confusion and diffusion also favored the use of block ciphers. At the same time, thanks to the CFB (Cipher FeedBack) mode used by AES, it is possible to produce results such as stream ciphers. A high level of security is provided with a 256-bit long key. In this article, the density that can be experienced in data transmission is mentioned. With this point, we provide data transfer with user datagram protocol (UDP) in order to control the data transfer in our study. Another important point in this regard is the protocol on which the commands to be sent from the controller to the drone. Since the devices used are Internet of things (IoT) devices, there are no high-capacity processors or memory. Therefore, the architecture should be designed taking these points into account. Since the devices we are working on are flying devices, we opted for smaller, less powerful devices to minimize weight. In other words, the main purpose is to provide maximum efficiency with our hardware assets. The most important contribution we extracted from the whole study was the idea of placing a buffer mechanism between the communication channel to improve security. This is one of the

fundamental points for our study. Another feature of our article is that the architecture described is turned into a prototype.

In the article [14], the modeling of the quadrotor DJI Tello drone in Python using fuzzy logic in artificial neural networks is presented. This modeling has also been implemented by Python. By controlling the drones, which are expressed in the study, starting to take up a large space in technologies; human detection/follow-up, analysis. Detection of data that does not have the class attribute used in classical machine learning models (for example, images flowing as streams in the drone) has been demonstrated.

In the study [15], the image taken from the camera autonomously and the determination of the location of the drone according to its own coordinates are presented. Due to its physical structure, the low cost of the algorithms running on the drone directly affects the flight time/power from the parallel measure. For this reason, in this study, object detection developed on the robot operating system based on MATLAB and a system that can detect the path by avoiding obstacles has been designed and implemented. At the same time, the results are clearly understood as the results are simulated with virtual reality.

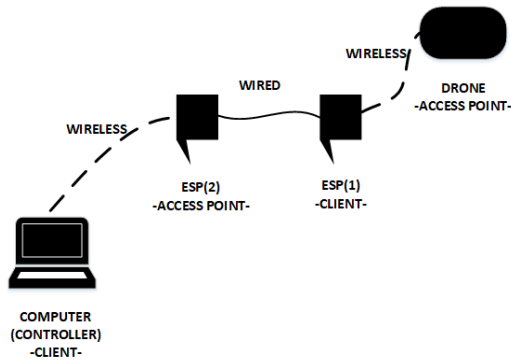
Study [16] examines the situation of taking control of drones with cyber-attacks and focuses on the control in the wireless channel. Attack scenarios were analyzed, and defense situations were put forward and implemented. In the wireless network, it has been focused on not only passive protection with password settings but also active protection against injections.

### 3. Materials and Methods

According to our study, an extra two Wi-Fi modules are needed to establish the architecture of secure communication. The main purpose of our study is to transfer the commands controlling drone, which is unmanned aerial vehicle, in a secure environment. Therefore, the modules used satisfy different functionalities.

There are two modules (ESP32 (1) and ESP (2) from Figure 1) interconnected by a physical cable. These modules are attached to the drone. One of the modules (ESP32 (2)) was turned into an access point. This means that when the module is connected to the power unit, an access point called service set identifier (SSID) that we define becomes visible on the Wi-Fi network. We have a controller person that controls the drone using the base station. In this study, the controller uses a mobile application to control the drone. The controller first connects [17] to the access point (Figure 1 ESP (2)). (S)he then enters the application on his/her smartphone, and s(he) encounters an interface with commands to control the drone.

The task of the module (ESP (2)) is to take encrypted commands from the controller via Wi-Fi and after decrypting the commands to transmit those to the other module (ESP (1)) via cable. The task of the next module (ESP (1)) is to take commands from the first module (ESP (2)) via cable and to transmit those commands to the drone via Wi-Fi using the special port and user datagram protocol (UDP). One reason to transfer the commands with UDP is because it's known that the drone allows it as written in the drone's software development kit (SDK) document. This module can also be called the client because it provides connection to the drone. The drone also has an access point feature.



**Figure 1.** Diagram of the proposed general mechanism.

One of the basic building blocks of the security in this mechanism is the mobile application. Because the mobile application encrypts the relevant command selected from the interface with AES and transmits it to the Wi-Fi module (ESP (2)), which is an access point, wirelessly. This module (ESP (2)) decrypts the command and transfers it to the other module via cable. The module that receives the command with the decrypted code forwards it to the drone and the drone executes the command. The main purpose of using buffer modules is to perform encryption operations and add a security layer to any kind of drone having a Wi-Fi connection.

In Figure 1, the described general mechanism diagram is schematized. There are two access points in this structure. One of them is our customized Wi-Fi module and the other is the drone. If no intervention is made, both the access point and the drone we defined will appear on the controller's Wi-Fi network. Therefore, there may be a dilemma. In our study, we designed a structure to prevent this dilemma. We covered the main frame of the drone with aluminum foil and steel fabric and put the module that sends the commands to the drone wirelessly with UDP in this structure which was covered. In this way, the drone with its 2.4 GHz broadcasting antenna has been covered and its broadcasting power has been reduced. The other module was placed on the drone with the cable extension. Since this module is an access point, it should be visible on the public network.

**3.1. Encryption and decryption mechanism**

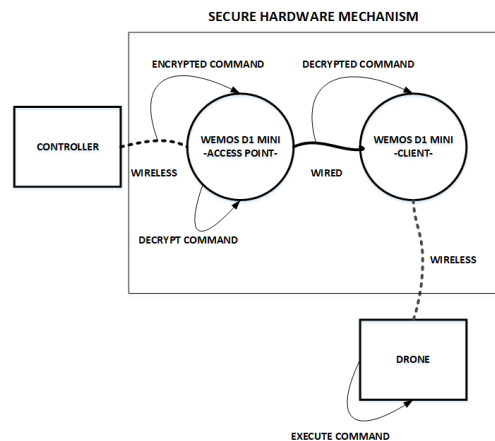
In our study, the encryption processes of the command to be sent are prepared on the mobile application. Encryption operations were carried out with AES and Base64 structures. While developing applications in Android environment, java/security, javax/crypto and libraries in which some functions were made special were used. The special here is to change the attribute formats that the functions take in accordance with the format of the incoming data. The purpose of this customization is to enable the encryption to be decrypted on an IoT device, the Wemos D1 Mini. Decryption is proceeded on the Wi-Fi module in the form of an access point (Figure 1, ESP (2)).

In our study, the Android application acts as the UDP Server. The Wi-Fi module in the Access Point form is also defined as the UDP Client. After encryption is proceeded on the application, the message is sent to the UDP Client with the internet protocol (IP) address of the module (192.168.4.1) and the specially defined port number (6868). It is preferred over TLS as it has UDP applicability with DJI Tello Drone. Although TLS is used in other model drones, UDP has been preferred for Tello in terms of both its compatibility with the encryption structure and its usefulness. The Wi-Fi module (Figure 1, ESP (2)) reads incoming messages from the UDP Server in packets of 512 bytes. Receiving the message as encrypted, UDP Client decrypts the message it receives in accordance with its encryption. In this way, data flows

in the wireless network encrypted. Commands that are decrypted in the module are sent to the other module in plaintext with the help of a small cable. While doing this sending process, the transmitter (TX) pin of the sending module is connected with the receiver (RX) pin of the receiving module. The sender writes the message (s)he will send to the serial platform. The recipient can also get the message by reading from the same serial platform.

This configuration prevents a man-in-the-middle attack, because the wireless connection between the computer and the drone is encrypted. The ESP modules are on the drone, connected by a wire, so unless an attacker can physically access the drone, there is no way for them to intrude the unencrypted communication. The second module relays the commands to the drone in unencrypted form, but because it's very close to the drone, it can't be affected by an attacker away from the drone.

In Figure 2 architectural view, the general mechanism of the study is summarized. The controller (ground control station) is connected wirelessly to the Wemos D1 Mini, which is an Access Point. The controller sends the encrypted command to the Access Point. The Access Point decrypts the command it receives in encrypted form. It then sends the command to the Wemos D1 Mini in Client mode to which it is wired. Client receiving the decoded command connects wirelessly to the drone and sends the command. The drone executes the command and sends the result of the execution to the Client. Wemos D1 Mini, which is one of the two wireless network devices used, makes the communication between the controller and the drone secure. The Client and Access Point actually function as if they were a single piece of hardware.



**Figure 2.** Architectural view.

**3.2. Executing commands on drone**

Wemos D1 Mini module, which receives commands with cable by decrypting, acts as a kind of client. Because this module connects to Tello DJI Drone that has the feature of Access Point automatically. It is this module that processes commands on the drone. This module communicates with the drone using the contact information specified in the SDK of the DJI Tello Drone.

The module, which establishes a wireless connection with the drone to operate the commands, communicates with the UDP. In this way, the operation requests from the user are made possible to operate the drone. It also returns a message when the drone is running or unable to run the messages it receives. In this message, it transmits the data to the module with UDP.

**3.3. Implementation platforms**

While performing this work, one Wemos D1 Mini, two separate Wi-Fi modules, and one mobile application were programmed.

Arduino integrated development environment (IDE) was used for programming the Wi-Fi modules [18]. We also used Android Studio while developing the mobile application.

The Android application was implemented on the Java platform. This application is defined as the UDP Server. The address and port to communicate as code forced were determined. After the user enters the command he wants to run on the screen, the command is encrypted using the relevant encryption structure and it is AES, Base64 in our study. Using the encrypted message and contact information, the message is sent to the Access Point in the form of UDP Client via UDP connection. For the Access Point to receive the sent encrypted message, the mobile application must be connected to the module that is the Access Point on the device's Wi-Fi network [19]. The application uses the UDP Socket connection and datagram packets when sending messages. Whenever a command is sent, it is encrypted to a distinct ciphertext, so that eavesdropper cannot make a guess which encrypted data corresponds to which command by using previously collected data.

While programming the modules acting as Access Points, we used libraries such as ESP8266WiFi, WifiUdp, AES, Base64. When we made the device visible in wireless networks, we assigned SSID and password. The Access Point then waits for the connection of the mobile application. Since the mobile application acts as UDP Server, the module opens the 6868 port where it will communicate with the server after the connection is established. Operations are initialized in the "setup" function. The "loop" function listens for requests from the UDP Server so that it can be answered. Until reaching the size of the package defined jointly between UDP Server and Client, the package is listened. The incoming packet is then decrypted. The decrypted message is written to the serial platform that it is wired to the other module.

Arduino IDE was used for programming the EPS32 modules. Wire, ESP8266Wifi and WifiUdp libraries were used while coding these modules. The Android application first tries to connect with the drone in the "setup" function. The "setup" function is used to define the initial values required for the program. For example: defining the port, specifying the constants to use, etc. After connection is established, UDP communication is initiated. In order to operate the commands on the DJI Tello drone, it is necessary to send the command "command" first. After the UDP connection is provided, this special start command is sent. Then the data coming from the serial platform is read inside the loop function that runs continuously. Thanks to the "loop" function, incoming commands can be handled continuously. When the related commands arrive to the EPS32 module (Figure 1, ESP (1)), it sends them to the drone. In this way, control of the drone is provided.

**4. Results**

In this project, improvements (The structure shown in Figure 2) were made on drone commands to be safely operated and transferred. According to these improvements, some tests were carried out.

According to the results obtained from this study, received encrypted messages are given in Table 1.

It is seen that the messages received from the controller are encrypted and when the same message is sent again, it sends unique encrypted messages. The "mixed" command shown in this table is not available in the SDK. This command was created by combining "take off, flip left and land" commands. The messages shown in the table are obtained from the Access Point (Figure 1, ESP (2)). Encrypted messages sent from the Mobile Application, which is the controller, are obtained from the Access Point. In

addition, this table shows us that the command transmitted on the Wi-Fi network that provides wireless communication is definitely not in understandable and readable form. This plays an important role in the safe transmission of commands transmitted for drone control. This added security layer contributes to the security part, which is the most critical point of unmanned aerial vehicles. In this way, an important improvement has been achieved.

**Table 1.** Received encrypted message.

Command Received	Encrypted Message
Mixed	lYyvabuBVdKmC0uHPcrp3g==
Mixed	nKhs3tUrtKnkScXIMcKZsQ==
Mixed	pOmSJeLXl2p7RcHQfwCGjQ==
Land	JsiuSDcPkgetvNuVIIPj8g==
Land	AvX3ig0V3c/yVaMhaN2yqQ==
Flip Left	77o6CNCINsj2kjsqVmqxQ==
Flip Left	IracWH2ZeYIILJv59RePw==
Takeoff	Z2S5m3P95xHKhH9I3QqIPg==
Takeoff	995QLzaoWuTOF/Zk9UrQrW==

Encrypted message transmission durations (Table 2) are prepared with the results obtained from the test studies. These durations are from the Controller to the Access Point. The end time is the time before transferring to the Wemos D1 Mini, which has a client feature, after decoding at the Access Point. These periods were obtained from the time outputs were given to the serial monitor of Arduino IDE. The stability of the system was checked by sending the same commands one after another for testing purposes. As shown in the table, regardless of the command sent, it can usually be transmitted around in 3 milliseconds. In addition, this table shows us that the command sent in encrypted does not cause a significant delay to slow down the operation. This is also very important for drones. For message transmission durations, at least 10 samples were taken for each command and their averages were taken.

**Table 2.** Encrypted message transmission durations.

Encrypted Received Message	Encrypted Transmission Duration (ms)
Mixed	2.6
Take off	3.5
Flip left	3
Land	3

The tests performed in calculating the values shown in Table 3 Plaintext Message Transmission Durations were used. While performing the calculations in this table, it is assumed that the Controller sends a command without encryption, explicitly sending the plaintext commands. This means that the data is sent without encryption in wireless network. When measuring the processes, the start time is that the Access Point receives the command, and the end time is sent to the Wemos D1 Mini with a cable connection. As can be seen from Table 3, most of these values are 0. This means that the added wired connection reduces the transmission time. This shows the usefulness of the mechanism designed in this study and the consistency of the



solution. While obtaining the data in Table 2 Encrypted Message Transmission Durations and Table 3 Plaintext Message Transmission Durations, at least 10 samples were taken for each command and their averages were taken.

**Table 3.** Plaintext message transmission durations.

Plaintext Received Message	Plaintext Transmission Duration (ms)
Mixed	0.33
Take off	0.5
Flip left	0
Land	0

The results of the study and the results obtained without using any security architecture are given in Table 4. Execution times are given for each command specified according to this table.

**Table 4.** With and without secure architecture command execution time comparison.

Command	Without Secure Architecture (ms)	With Secure Architecture (ms)
Take off	6651	7512
Flip left	2870	2462
Land	3284	4152

The data received in the Without Secure Architecture column were obtained as a result of direct communication between the computer and the drone. While obtaining these calculations, a software program developed with Node.js was run. During these tests, 10 different samples were collected for each command. For each sample, the start time was when the command was sent, and the end time was when the command was run in the drone. The averages of the received values were taken and given in the table.

The results in the With Secure Architecture column were obtained as a result of running commands over the Security Architecture described in the article. While calculating these processes, the start time is to send the command with an encrypted mobile application and the end time is to execute the command in the drone. These values were found by averaging at least 10 samples for each command.

This table was prepared to compare the security mechanism developed in the execution of commands in general with the system that the drone is directly linked to. The results show that with the hardware part put to ensure the security of the structure, the encryption and decryption mechanisms did not create too many differences that could create control problems in practice. In fact, the values are too small to notice the time difference for humans.

**5. Discussion and Conclusion**

In this study, Wemos D1 Minis with two Wi-Fi modules were placed between the drone and the control station. One of these modules was converted to an Access Point and the other to a Client form. The module in the Client form was designed to provide a UDP connection with the drone. The Mobile Application, which acts as the controller, has been developed and the connection of the device with this application to the Wi-Fi module in Access Point form has been provided. Modules in the form of Client and Access Point were connected with a cable to provide serial communication. With this structure, encrypted transmission of commands sent from Mobile Application was provided. With the help of Wi-Fi modules put together, these

encrypted messages are decrypted, and the drone is operated. Thanks to this structure, security was provided between the drone and the controller without creating a significant delay.

**Ethics committee approval and conflict of interest statement**

There is no need for an ethics committee approval in the current article.

There is no conflict of interest with any person/institution in the current article.

**Author Contribution Statement**

All authors contributed equally to this manuscript, and they have accepted responsibility for the entire content of this manuscript and approved its submission.

**References**

- [1] Urien, P. 2018. An Innovative Four-Quarter IoT Secure Architecture Based on Secure Element. 14th Int. Wireless Communications & Mobile Computing Conf. (IWCMC), 25-29 June, Limassol, 1074-1080, DOI: 10.1109/IWCMC.2018.8450435.
- [8] Kubilay, İ. A. and Kubilay, H. 2018. Drone Design for Abiding Legal Guidelines. International Conference on Science and Technology, 5-9 September, Prizren, 482-488.
- [9] Rodday, N. M., Schmidt, R. D. O. and Pras, A. 2016. Exploring security vulnerabilities of unmanned aerial vehicles. NOMS 2016 - 2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, 25-29 April, Istanbul, 993-994, DOI: 10.1109/NOMS.2016.7502939.
- [10] Verup, M. and Olin, M. 2016. Security models and exploitations in theory and practice for unmanned aerial vehicles. <http://www2.compute.dtu.dk/pubdb/edoc/imm7054.pdp> (Accessed on: 07.03.2023).
- [5] Hartmann, K. and Giles, K. 2016. UAV Exploitation: A New Domain for Cyber Power. 8th Int. Conf. on Cyber Conflict, 31 May-03 June, Tallinn, 205-221, DOI: 10.1109/CYCON.2016.7529436.
- [6] Bian, J., Seker, R. and Xie, M. 2013. A secure communication framework for large-scale unmanned aircraft systems. 2013 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, 22-25 April, Herndon, 1-12, DOI: 10.1109/ICNSurv.2013.6548542.
- [7] Bian, J., Seker, R., Ramaswamy, S. and Yilmazer, N. 2009. Container communities: Anti-tampering Wireless Sensor Network for global cargo security. 17th Mediterranean Conference on Control and Automation, 24-26 June, Thessaloniki, 464-468, DOI: 10.1109/MED.2009.5164585.
- [8] Mitchell, R. and Chen, I. R. 2014. Adaptive Intrusion Detection of Malicious Unmanned Air Vehicles Using Behavior Rule Specifications, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, Vol. 44, no. 5, pp. 593-604, DOI: 10.1109/TSMC.2013.2265083.
- [9] Gupta, L., Jain, R. and Vaszkun, G. 2016. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 18, no. 2, pp. 1123-1152. DOI: 10.1109/COMST.2015.2495297.
- [10] Deva Sarma, H. K. and Kar, A. 2006. Security Threats in Wireless Sensor Networks. 40th Annual 2006 Int. Carnahan Conf. on Security Technology, 16-19 October, Lexington, 243-251, DOI: 10.1109/CCST.2006.313457.
- [11] Samid, G. 2016. Drone Targeted Cryptography, IACR Cryptol. ePrint Arch., pp. 499-506.
- [12] He, D., Chan, S. and Guizani, M. 2017. Drone-Assisted Public Safety Networks: The Security Aspect, IEEE Communications Magazine, Vol. 55, no. 8, pp. 218-223, DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600799CM.
- [13] Singh, M., Rajan, M. A., Shivraj, V. L. and Balamuralidhar, P. 2015. Secure MQTT for Internet of Things (IoT). Fifth Int. Conf. on Communication Systems and Network Technologies, 4-6 April, Gwalior, 746-751.
- [14] Giernacki, W., Rao, J., Sladic, S., Bondyra, A., Retinger, M. and Espinoza-Fraire, T. DJI Tello Quadrotor as a Platform for Research and Education in Mobile Robotics and Control Engineering. 2022 Int. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 21-24 June, Dubrovnik, 735-744, DOI: 10.1109/ICUAS4217.2022.9836168.
- [15] Giernacki, W., Kozierski, P., Michalski, J., Retinger, M., Madonski, R. and Campoy, P. 2020. Bebop 2 Quadrotor as a Platform for Research and Education in Robotics and Control Engineering. 2020 Int. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 1-4 September, Athens, 1733-1741, DOI: 10.1109/ICUAS48674.2020.9213872.
- [16] Mamchenko, M. V. 2021. Analysis of Control Channel Cybersecurity of the Consumer-Grade UAV by the Example of DJI Tello, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1864, DOI: 10.1088/1742-6596/1864/1/012127.

- [17] Radu, D., Cretu, A., Avram, C., Astilean, A. and Parrein, B. 2018. Video Content Transmission in a Public Safety System Model based on Flying Ad-Hoc Networks. 2018 IEEE Int. Conf. on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), 24-26 May, Cluj-Napoca, 1-4, DOI: 10.1109/AQTR.2018.8402713.
- [18] DJI Company 2023. Tello SDK 2.0. <https://dl-cdn.rlyzerobotics.com/downloads/Tello/Tello%20SDK%202.0%20User%20Guide.pdf> (Accessed on: 07.03.2023).
- [19] Valente, J., Cardenas, A. A. 2017. Understanding Security Threats in Consumer Drones Through the Lens of the Discovery Quadcopter Family. 2017 Workshop on Internet of Things Security and Privacy, 30 October-3 November, Dallas, 31-36, DOI: 10.1145/3139937.3139943.

<http://web.deu.edu.tr/fmd>

E-ISSN 2547-958X



9 771302 930005 >