



Institute of Pure and Applied Sciences

International Journal of Advances
in Engineering and Pure Sciences

MARMARA JEPS



In the name of Rectorate of Marmara University, Rector
Prof. Dr. Mustafa KURT

In the name of Directory of Institute of Pure and Applied Sciences, Director
Prof. Dr. Bülent EKİCİ

Editor-in-Chief
Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ

Associate Editors
Prof. Dr. Bülent EKİCİ, Prof. Dr. Bülent AKKOYUNLU

Editorial Boards

Dr. Aris Quantana NEDELCO,
Materials Science

Asst. Prof. Dr. Berçem KIRAN YILDIRIM,
Chemical Engineering

Asst. Prof. Dr. Beste TURANLI,
Bioengineering

Prof. Dr. İsmail USTA,
Textile Engineering

Prof. Dr. Kazım Yalçın ARĞA,
Bioengineering, Bioinformatics

Asst. Prof. Dr. Merve ER,
Industrial Engineering

Dr. Mohammad ALSUNAIDI,
Electrical and Electronics Engineering

Prof. Dr. Mustafa ATMACA,
Mechanical Engineering-Energy

Asst. Prof. Dr. Z. Aysun ALTIKARDEŞ,
Computer Science and Medical Informatics

Assoc. Prof. Dr. Mustafa ÖZDEMİR,
Mechanical Engineering- System Dynamics and Mechanics

Assoc. Prof. Dr. Mustafa Taylan ŞENGÜL,
Mathematics

Assoc. Prof. Dr. Ömer KORÇAK,
Computer Science and Engineering

Assoc. Prof. Dr. Pınar ÇAĞLAYAN,
Biology

Asst. Prof. Dr. Rosa Maria FLORES,
Environmental Engineering

Dr. Sergey V. DOROZHKIN,
Bio-Materials (Ceramics)

Prof. Dr. Uğur YAHŞI,
Physics

Prof. Dr. Yahya BOZKURT,
Material Sciences

Assoc. Prof. Dr. Yeşim GÜRTUĞ,
Architectural and Civil Engineering

Asst. Prof. Dr. S. Enes HACİBEKTAŞOĞLU
Occupational Safety

Publishing Editor

Arda ŞAHİN

Correspondance and Communication

Hayriye KORKMAZ
Electrical and Electronics Engineering,
Faculty of Technology, T4-211
Maltepe /ISTANBUL
Tel: +90 216 777 3830
hkorkmaz@marmara.edu.tr

Publisher

Marmara University Press
Göztepe Kampusu 34722
Kadıkoy/ISTANBUL
Tel: +90 216 777 1408
yayinevi@marmara.edu.tr

Marmara Üniversitesi Rektörlüğü adına, *Rektör*
Prof. Dr. Mustafa KURT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü adına, *Müdür*
Prof. Dr. Bülent EKİCİ

Editör

Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ

Yardımcı Editörler

Prof. Dr. Bülent EKİCİ, Prof. Dr. Bülent AKKOYUNLU

Editörler Kurulu

Dr. Aris Quantana NEDELCOŞ,
Malzeme Bilimleri

Dr. Öğretim Üyesi Berçem KIRAN YILDIRIM,
Kimya Mühendisliği

Dr. Öğretim Üyesi Beste TURANLI,
Biyomühendislik

Prof. Dr. İsmail USTA,
Tekstil Mühendisliği

Prof. Dr. Kazım Yalçın ARĞA,
Biyomühendislik, Biyoinformatik

Dr. Öğretim Üyesi Merve ER,
Endüstri Mühendisliği

Dr. Mohammad ALSUNAI,DI,
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Prof. Dr. Mustafa ATMACA,
Makine Mühendisliği- Enerji

Dr. Öğretim Üyesi Z. Aysun ALTIKARDEŞ
Bilgisayar Bilimleri ve Medikal Bilişim

Doç. Dr. Mustafa ÖZDEMİR,
Makine Mühendisliği- Sistem Dinamiği ve Mekanığı

Doç. Dr. Mustafa Taylan ŞENGÜL,
Matematik

Doç. Dr. Ömer KORÇAK,
Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği

Doç. Dr. Pınar ÇAĞLAYAN,
Biyoloji

Dr. Öğretim Üyesi Rosa Maria FLORES,
Çevre Mühendisliği

Dr. Sergey V. DOROZHKIN,
Biyomalzemeler (Seramikler)

Prof. Dr. Uğur YAHŞI,
Fizik

Prof. Dr. Yahya BOZKURT,
Malzeme Bilimleri

Doç. Dr. Yeşim GÜRTUĞ,
Mimarlık ve İnşaat Mühendisliği

Dr. Öğretim Üyesi S. Enes HACİBEKTAŞOĞLU
İş Güvenliği

Yayın Editörü
Arda ŞAHİN

Yazışmalar ve İletişim

Hayriye KORKMAZ
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği,
Teknoloji Fakültesi, T4-211
Maltepe /İSTANBUL
Tel: +90 216 777 3830
hkorkmaz@marmara.edu.tr

Yayıncı

Marmara Üniversitesi Yayınevi
Göztepe Kampusu 34722
Kadıköy/İSTANBUL
Tel: +90 216 777 1408
yayinevi@marmara.edu.tr

İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

Araştırma Makaleleri/ Research Articles

1. Yüzen Güneş Enerjisi Sistemlerinin İncelenmesi, Çevresel Katkıları ve Türkiye'deki Barajların Yüzen Güneş Enerjisi Potansiyeli

Hüseyin ŞENLİ

Sayfa/Page: 418 - 427

2. Üç Boyutlu ve Katmanlı Bakır Organodifosfonat Koordinasyon Polimerinin Sentezi, Karakterizasyonu, Katalitik ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi

Burak AY

Sayfa/Page: 428 - 438

3. Poli-fenilen-Sülfid Polimer Kompozitine Karşı Poliamit-6 Polimeri ile Mika ve Cam Elyaf Takviyeli Poliamit-6 Polimer Kompozitlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları

Hüseyin ÜNAL, Salih Hakan YETGİN, Mustafa GÜLEŞEN

Sayfa/Page: 439 - 446

4. Retina Damar Segmentasyonunda Sinir Mimarisi Arama İçin Farklı Kodlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Zeki KUŞ, Berna KİRAZ

Sayfa/Page: 447 - 459

5. İki Aşamalı Risk Değerlendirme Yöntemi ile Havacılık Sektöründe Uygulama

Beyzanur ÇAYIR ERVURAL

Sayfa/Page: 460 - 484

6. Doğalgaz Yakıtlı Düz Alevli Endüstriyel Brülör Tasarımı

Nihat Enes TURAN, Ayhan ONAT, Selim HARTOMACIOĞLU

Sayfa/Page: 485 - 493

7. Ayçiçeği Kabuğu Takviyeli Biyo-Epoksi Matrisli Çevreci ve Maliyet Etkin Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Mekanik Karakterizasyonu

Asya Nur SUNMAZ, Ulaş DOĞAN, Alaeddin Burak İREZ

Sayfa/Page: 494 - 503

8. Taşıt Sürücülerinin Tüm Vücut Titreşim Maruziyetlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi

Akif YAVUZ

Sayfa/Page: 504 - 514

İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

Araştırma Makaleleri/ Research Articles

9. Glukoz Sensörü Olarak Kullanılmak Üzere İndirgenmiş Grafen Oksit Katkılı Polimerik Film Eldesi
Neslihan ALEMDAR
Sayfa/Page : 515 – 522

10. A Comparison of Force Distribution Effects of Ductile and Brittle Adhesives at Different Hole Positioning
Sermet DEMİR, Uğur KEMİKLİOĞLU
Sayfa/Page : 523 – 530

Geri Çekme Makaleleri/ Withdrawal

11. Farklı Uzunluklarda Dinamik Kalça Vidası Yan Plakaları ile İntertrakanterik Kalça Kırığı Tedavisinin Biyomekanik Analizi
Oğuz KAYABAŞI
Sayfa/Page : 531 – 537

Yüzen Güneş Enerjisi Sistemlerinin İncelenmesi, Çevresel Katkıları ve Türkiye'deki Barajların Yüzen Güneş Enerjisi Potansiyeli

Investigation of Floating Solar Systems, Environmental Benefits and The Floating Solar Energy Potential of Dams in Turkey

Hüseyin ŞENLİ¹ 

¹Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye

Öz

Artan nüfus ve sanayileşme sebebiyle ihtiyaç duyulan enerji miktarı da sürekli artmaktadır. Bu enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayan fosil yakıtlar çevre kirliliğine sebep olmakta ve giderek azalmaktadır. Tam bu noktada yenilenebilir enerji kaynakları ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada, su kaynakları üzerinde yenilenebilir enerji üretimine olanak sağlayan yüzen güneş enerjisi sistemleri incelenmiştir. Bu sistemlerin genel yapısından, uygulamalarından, olumlu ve olumsuz yönlerinden ve çevreye sağladığı faydalardan bahsedilmiştir. Kurulumu için bir araziye ihtiyaç duyulmayan yüzen güneş enerjisi sistemleri kısıtlı araziye sahip bölgeler için önemli hale gelmektedir. Yenilenebilir bir enerji kaynağı olması CO₂ ve diğer zararlı gazların salınımını azaltmaktadır. Suyun soğutma özelliği sayesinde karasal sistemlere kıyasla daha fazla enerji üretimini mümkün kılmaktadır. Kuruldukları su kaynaklarında buharlaşma ile kaybolan su miktarını azaltmakta, gölgeleme etkisi sayesinde alglerin çoğalmasına engel olarak su kalitesini ve temizliğini arttırmaktadır. Enerji üretimi, içme, sulama suyu temini ve taşkın korunma sağlayan barajlar üzerine kurulacak bu yüzen güneş enerjisi sistemleri ile barajlar üzerinde yeni bir enerji kaynağı oluşturulması ve baraj sularının buharlaşma ile kaybının azaltılması sağlanabilmektedir. Türkiye'deki en büyük 5 baraj gölüne kurulacak farklı büyüklüklerdeki yüzen güneş enerjisi sistemleri ile üretilebilecek enerji miktarları ve buharlaşma ile kaybı önlenen su miktarları hesaplanmıştır. Baraj göllerinin yüzey alanlarının %0,1, %0,5 ve %1'ine kurulacak yüzen güneş sistemleri ile sırasıyla toplam 414,47 GWh, 2072,36 GWh ve 4144,72 GWh enerji üretilebileceği ayrıca 1,58x10⁶ m³/yıl, 7,88x10⁶ m³/yıl ve 15,75x10⁶ m³/yıl suyun buharlaşma ile kaybının önenebileceği hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Barajlar, Buharlaşma, Su Kaynakları, Yenilenebilir Enerji, Yüzen Güneş Enerjisi Sistemleri

Abstract

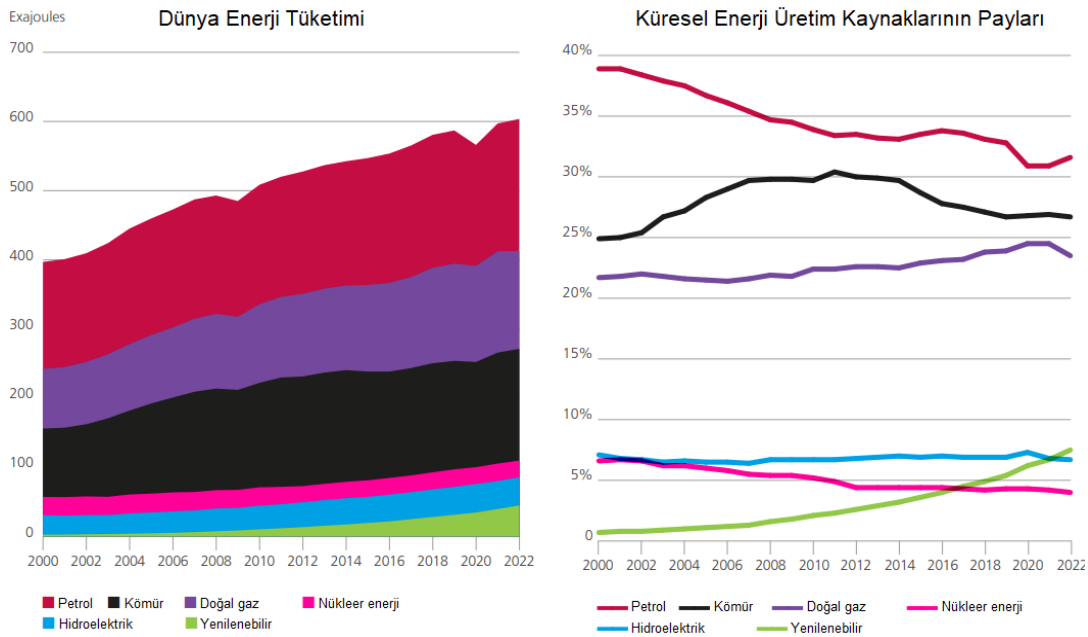
Due to the increasing population and industrialization, the amount of energy needed is also increasing. Fossil fuels meet most of energy need, are gradually decreasing and cause environmental pollution. At this point, renewable energy sources take over. In this paper, floating solar energy systems that enable renewable energy generation on water sources were researched. The general structure of these systems, their applications, advantages and disadvantages and their benefits to the environment were mentioned. Floating solar systems, which do not need land to install, are becoming important for regions with limited land. Being a renewable energy source reduces the release of CO₂ and other toxic gases. Owing to the cooling effect of the water, it makes it possible to generate more energy compared to terrestrial systems. These systems decrease the amount of water loss by evaporation and increases water quality by preventing the growth of algae by shading effect. With floating solar energy systems that will be installed on dams that provide energy, drinking, irrigation water supply and flood protection, it is possible to create a new energy source on the dams and reduce the loss of dam water by evaporation. It has been calculated that by floating solar systems to be installed on 0,1%, 0,5% and 1% of the surface areas of the 5 largest dam lakes in Turkey, total 414,47 GWh, 2072,36 GWh and 4144,72 GWh energy can be generated, respectively, also 1,58x10⁶ m³/year, 7,88x10⁶ m³/year and 15,75x10⁶ m³/year the loss of water by evaporation can be prevented.

Keywords: Dams, Evaporation, Water Resources, Renewable Energy, Floating Solar Energy Systems

I.GİRİŞ

Her geçen gün Dünya'nın enerji ihtiyacı artan nüfus ve endüstriyel gelişmeler sebebiyle artmaktadır. Bu enerji ihtiyacının büyük bir çoğunluğunu karşılayan fosil yakıtlar ise hızla tükenmekte olup bunun yanı sıra bu yakıtlar CO₂ gibi sera gazları salınımından ötürü çevreye birçok zarar vermektedir. Aynı zamanda iklim değişiklikleri ve küresel ısınmaya sebep olan faktörlerin başında yer almaktadır. Bu sebeple enerji ihtiyacını çevre dostu ve temiz bir şekilde karşılayabilmek amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim hızla artmaktadır. Yıllardır bu enerji kaynaklarını teşvik edici birçok çalışma yapılmış, uluslararası anlaşmalar (Kyoto Protokolü vb.)

imzalanmıştır. Dünya'da 2022 yılı birincil enerji kaynaklarının paylarına bakıldığında petrol %32, kömür %26,6, gaz %23,4, yenilenebilir %7,5, hidrolik enerji %6,3 ve nükleer %4 olarak açıklanmıştır [1]. Türkiye 2022 yılı verilerine göre birincil enerji arzındaki dağılım ise %30,8 doğal gaz, %28 petrol, %25,5 kömür, %3 hidrolik enerji ve %12,6 diğer yenilenebilir kaynaklar (güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle) şeklinde gerçekleşmiştir (TMMOB Makine 2023 sunum) [2]. Enerji dağılımları göz önüne alındığında %80'e varan orana sahip fosil yakıtlar enerji üretiminde çok yüksek bir paya sahiptir. Dünya genelinde enerji kaynaklarına göre tüketilen enerji miktarları ve birincil enerji üretim kaynaklarının payları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Dünya enerji tüketimi ve enerji üretim kaynaklarının payları [1]

Yenilenebilir enerji kaynakları; güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, hidrolik enerji, hidrojen enerjisi ve dalga enerjisi olarak sınıflandırılmaktadır [3]. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında; Dünya genelinde yenilenebilir enerji üretim kapasitesinde yüksek bir paya sahip olan güneş enerjisi sistemlerinin üretim kapasiteleri 2022 yılı verilerine göre 1053115 megawatts (MW) hesaplanmıştır [1]. Türkiye'de ise 2022 verilerine göre güneş enerjisine dayalı kurulu güç 8476 MW olarak verilmiştir. Bu da toplam kurulu gücün %8,35'ine denk gelmektedir [4].

Güneş enerjisi sistemleri, güneşten gelen ışınları fotovoltaik (FV) paneller aracılığıyla elektrik enerjisine ve termal enerjiye dönüştürmektedir. Fotovoltaik sistemler kurulumlarına göre 5 gruba ayrılmıştır. Bunlar toprak üstü/karasal sistemler, çatı üstü sistemler, kanal üstü sistemler, açık deniz sistemleri ve su kütleleri üzerine kurulan yüzen sistemlerdir [5].

Karasal sistemlerde paneller çelik veya beton ayaklar vasıtasıyla zemine monte edilir. En çok uygulaması

bulunan sistem türüdür. Çatı üstü sistemler konut veya ticari yapıların çatılarına yerleştirilen panellerden oluşmaktadır. Kanal üstü sistemler genellikle tarımsal arazilerde bulunan sulama kanalları üzerine kurulan ilave bir araziye ihtiyaç duymayan sistemlerdir. Açık deniz sistemleri güneş ışınlarını tam olarak almaya olanak sağlayan deniz ve okyanus üzerine kurulan sistemlerdir. Yüzen sistemler ise bir araziye ihtiyaç duymadan mevcut su kaynakları üzerine kurulan güneş enerjisi sistemleridir.

Bu çalışmada su kütleleri (göl, gölet, baraj gölü, lagün, sulama havuzları, su arıtma tesisleri, rezervuarlar vb.) üzerine kurulan yüzen güneş enerjisi sistemlerinin genel yapısı, uygulamaları, avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Üzerine kuruldukları su kaynaklarına ve çevreye ne gibi olumlu etkileri olduğunu anlatmak amaçlanmıştır. Ayrıca büyük bir su yüzey alanına sahip Türkiye barajlarına kurulacak

yüzen güneş enerjisi sistemlerinin potansiyelinden bahsedilmiştir. Bu sistemlerin barajlar üzerinde üretebileceği yenilenebilir enerji ve barajların su kaynaklarının korunmasına katkıları üzerine çalışılmıştır.

II. YÜZEN GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ

Yüzen güneş enerjisi sistemleri (YGES), temiz ve yenilenebilir enerji üretimine olanak sağlayan ve bunun için bir araziye ihtiyaç duyulmayan fotovoltaik sistemlerdir. Bu sistemler; göller, göletler, lagünler, barajlar, kanallar, sulama havuzları, su arıtma tesisleri vb. gibi birçok su kütlesi üzerine kurulabilmektedir. Ayrıca suyun soğutma etkisi sayesinde karasal sistemlere göre daha fazla enerji üretebilmekte, su yüzeyine yaptığı gölgeleme sayesinde buharlaşma ile kaybedilen su miktarını azaltmaktadır.

2.1. Yüzen Güneş Enerjisi Sistemlerinin Bileşenleri

Karasal güneş enerjisi sistemlerine benzer bir şekilde yüzen sistemlerde de güneş panelleri, kablolar ve güç çeviricilerinden oluşmaktadır. Bunlara ek olarak panellerin su üzerinde kalmasını sağlayan yüzen bir platform ve yüzen platformun serbestçe hareketini engelleyen bağlama sistemleri bulunmaktadır. Yüzen

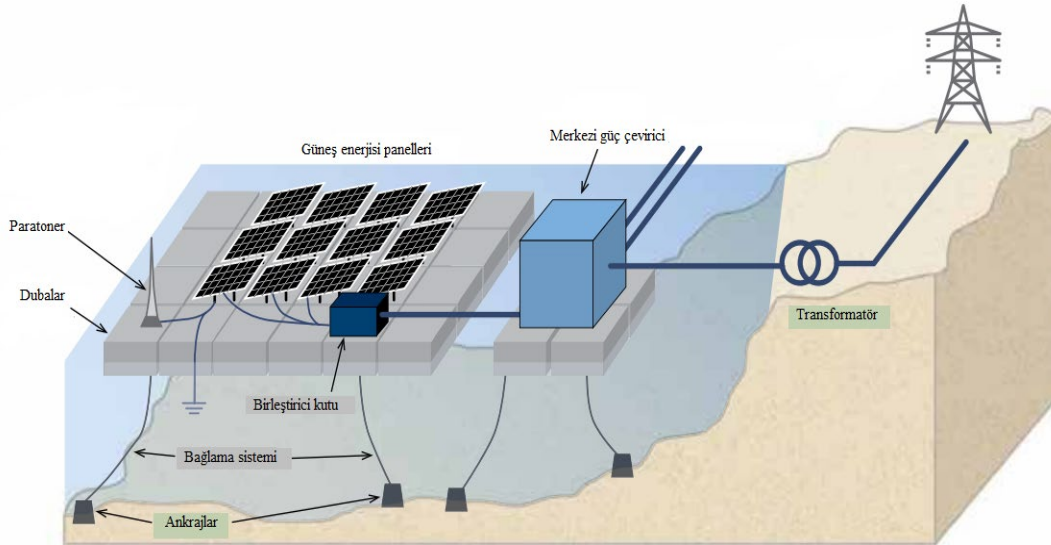
güneş enerjisi sistemleri bileşenleri aşağıdaki gibi gruplandırılmıştır [6].

Dubalar: Birçok şamandıranın bir araya getirilmesi oluşturulan dubalar sistemi yüzdürme görevi üstlenmektedir. Dubalar, bakım gerektirmeyen, UV ve korozyon direncine sahip ve geri dönüştürülebilir bir malzeme olan yüksek yoğunluklu polietilenden (HDPE) üretilmektedir. Sistemin mekanik ve elektriksel aksamı da bu yüzen platformlara monte edilmektedir.

Bağlama sistemi: Bağlama sistemi yüzen platformları aynı konumda tutmakta ve serbestçe hareket etmelerini önlemektedir.

Güneş enerjisi modülü: Güneş ışınlarını enerjiye dönüştüren bu panellerde standart kristal güneş enerjisi modülleri kullanılmaktadır. Yüksek nemli bölgelerde ve tuzlu su üzerindeki sistemlerde korozyonu önlemek adına korozyona dayanıklı malzemeler tercih edilmelidir.

Kablolar ve konektörler: Panellerde üretilen enerjiyi güç çeviricilere kablolar ve konektörler iletmektedir. Kablolar su geçirmez ve UV ışınlarına dayanıklı olacak şekilde tasarlanmıştır.

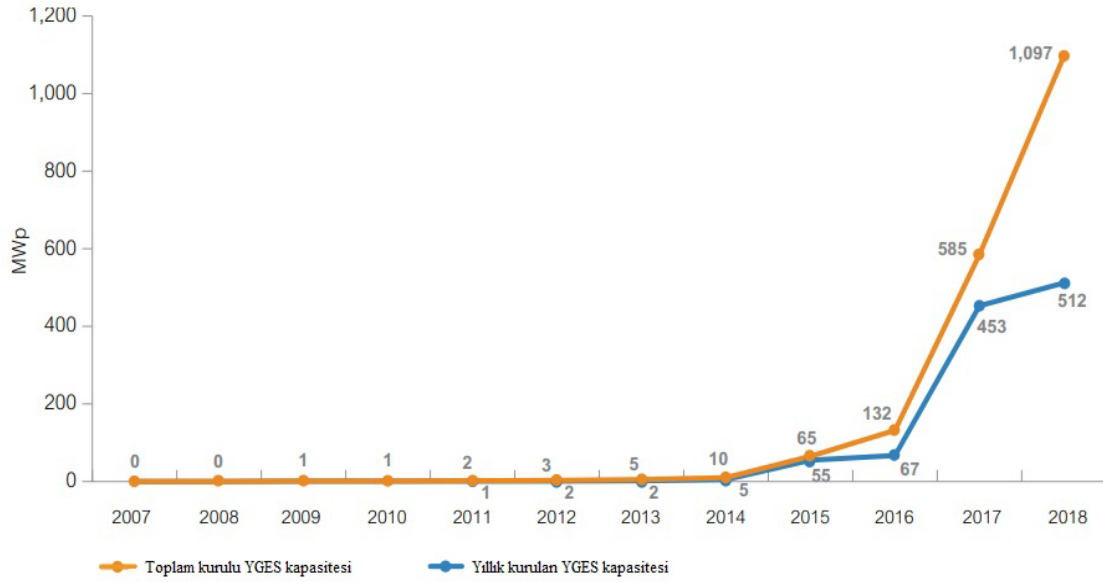


Şekil 2. Tipik bir yüzen güneş enerjisi sistemi şematığı (World Bank, ESMAP, SERIS) [7]

2.2. Yüzen Güneş Enerjisi Sistemi Uygulamaları

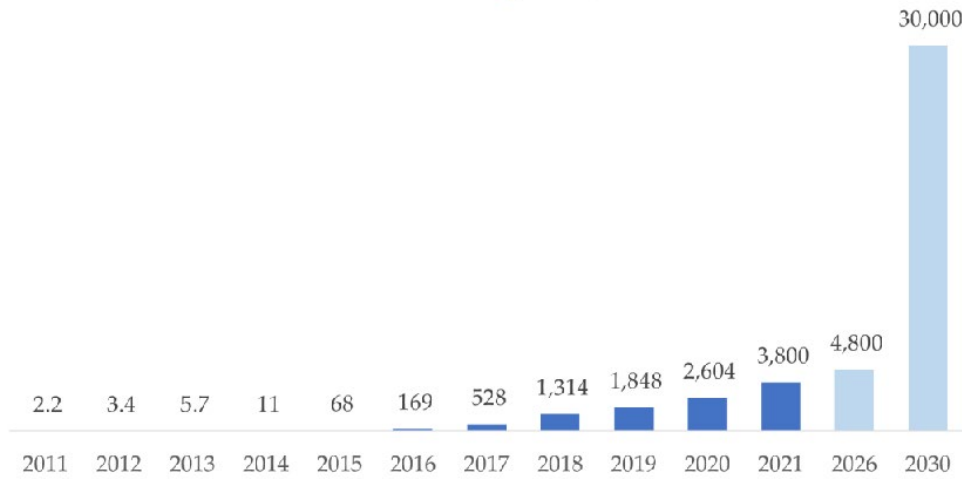
Yüzen güneş enerjisi sistemleri yeni sayılabilecek bir fikir olmasına karşın çevre dostu ve verimli bir enerji kaynağı olması, teknolojinin hızla gelişmesi, devletlerin yenilenebilir enerji faaliyetlerine

yönelinin ve teşviklerinin artması YGES'lere olan talebi de her geçen gün arttırmaktadır. Dünya genelinde YGES kapasitelerindeki yıllara göre artışı ve ileriki yıllarda öngörülen YGES kapasiteleri Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Dünya genelinde kurulu yüzen güneş enerjisi sistem kapasitelerinin yıllara göre değişimi (World Bank, ESMAP, SERIS) [7]

DÜNYA GENELİ YÜZEN GÜNEŞ ENERJİSİ KAPASİTESİ (MW)



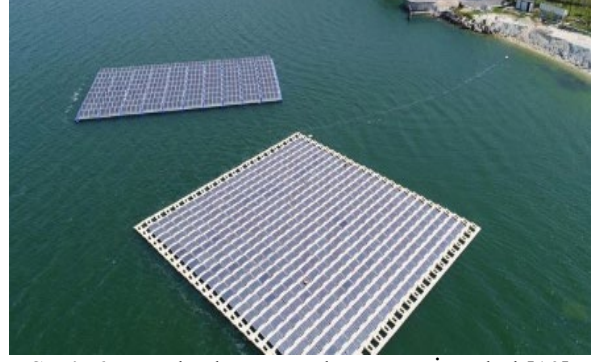
Şekil 4. Dünya genelinde yıllara göre mevcut ve ileriki yıllarda öngörülen yüzen güneş enerjisi kapasiteleri [8]

Yüzen güneş enerjisi sistemleri ile ilk patent girişimlerini Japon, İtalyan, Amerikan, Fransız ve Dan şirketler yapmıştır. İlk YGES yapımı 2007 yılında Japonya'nın Aichi şehrinde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra İtalya, Kore, İspanya, Amerika gibi birçok ülkede de çalışmalar yapılmıştır. Bu projeler küçük ölçekli ve araştırma amacı güden projeler olmuştur. İlk ticari

YGES Amerika'da Oakville şehrinde Far Niente şarap imalathanesindeki bir rezervuar üzerine 2008 yılında kurulmuştur ve 175 kW kapasitesindedir [9]. Türkiye'de ilk YGES örneği 2017 yılında Büyükçekmece Gölü üzerinde hayata geçirilmiş olup 240 kW güce sahiptir [10].



Şekil 5. Far Niente şarap imalathanesi YGES, California [11]



Şekil 6. Büyükçekmece Gölü YGES, İstanbul [10]

Son 5 yılda yüzen güneş enerjisi sistemlerine yatırımların artmasıyla birlikte yapılan projeler daha büyük ölçekli projeler haline gelmekte sistemlerin güç kapasiteleri de büyük ölçüde artmaktadır. Bu sistemlere en büyük ilgiyi Asya ülkeleri (Japonya, Çin, Kore, Hindistan) göstermektedir. Kurulu güç kapasitesinin çok büyük bir kısmı bu bölge üzerindedir. Aşağıda kapasitelerine göre yapımı süren veya tamamlanmış olan en büyük 10 YGES projesi listelenmiştir [12].

1. Saemangeum floating solar energy project – 2.1 GW, Güney Kore, 2023
2. Omkareshwar Dam floating solar farm – 600 MW, Hindistan, 2023
3. Hangzhou Fengling Electricity Science Technology's solar farm – 320 MW, Çin, 2020
4. Three Gorges New Energy's floating solar farm – 150 MW, Çin, 2018
5. Cirata Reservoir floating photovoltaic power project – 145 MW, Endonezya, 2020
6. NTPC Kayamkulam solar project – 105 MW, Hindistan, 2019
7. NTPC Ramagundam solar power plant – 100 MW, Hindistan, 2020
8. CECEP's floating solar project – 70 MW, Çin, 2019
9. Sembcorp's Tuas floating solar project – 60 MW, Singapur, 2020
10. Hapcheon Dam floating PV power plant – 41 MW, Güney Kore, 2020

III. YÜZEN GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNİN DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde yüzen güneş enerjisi sistemlerinin teknolojik, ekonomik ve çevresel olarak ne gibi olumlu yönlerinin olduğundan ve olası olumsuz yönlerinden bahsedilmiştir.

3.1. Olumlu Yönleri

- a) Arazi ihtiyacı duyulmadan mevcut su kaynakları üzerine kurulabilmektedir. Herhangi bir tarım veya orman arazisi kaybına sebebiyet vermemektedir. Toprak kıtlığı çekilen bölgelerde temiz enerji üretmek adına iyi bir seçenektir.
- b) Genel olarak hafif bir yapıya olması ve beton veya çelik bir temele sahip olmaması sayesinde kurulumu kolaydır. Ayrıca gerektiği durumlarda döndürülebilmektedir.
- c) Fotovoltaik panellerin aşırı ısınma hallerinde verimliliği düşmektedir. Yüzen güneş enerjisi sistemlerinde suyun panelleri soğutması %15'e varan enerji üretim artışı sağlamaktadır. Yapılan bir çalışmaya göre yüzen sistemlerin karasal sistemlere kıyasla %11 daha fazla enerji ürettiği tespit edilmiştir [13].
- d) Kurulduğu su kaynağında su yüzeyinin güneş ve hava ile temasını keserek suyun ısınmasını önler ve buharlaşma ile oluşan su kaybını azaltır. Buharlaşmayı doğal göllerde %33, yapay göllerde %50 azalttığı gözlemlenmiştir [5]. Sulama kanalları ve küçük akarsularda ise buharlaşmada %70'e varan düşüşler gerçekleşebilmektedir [14].
- e) Sistemin gölgeleme etkisi suyun ışıkla temasını keserek alg oluşumunu azaltmakta dolayısıyla su kirliliği azalmakta, su kalitesi artmaktadır [13].
- f) Barajlar, sulama kanalları ve havuzları vb. gibi halihazırda işlevselliği bulunan su kütleleri üzerine kurularak enerji üretimi sağlanıp işlevsellikleri artırılabilir.
- g) Yenilenebilir bir enerji kaynağı olması sayesinde CO₂ salınımı önlenmektedir.
- h) Tatlı su kaynakları üzerine kurulan sistemlerde panel temizliği için gerekli olan su üzerinde bulunduğu kaynaktan karşılanabilmekte ve panellerin enerji verimliliği artırılabilir [16].

3.2. Olumsuz Yönleri

- a) Yüksek ilk kurulum ve bakım maliyetine sahiptir. Karasal sistemlere kıyasla yüzen sistemler daha maliyetlidir. Maliyetler ülkeye ve projeye göre

- değişiklik göstermektedir. Ancak bu fiyat farkı gün geçtikçe azalmaktadır.
- Kurulumu rijit bir şekilde gerçekleştirilen karasal sistemlerle karşılaştırıldığında yüzen platformlar ne kadar sabitlenseler de su üzerinde hareketli bir yapıda olduklarından dolayı kırılmalara sahip paneller hasar alabilir.
 - Sabit bir yapıya sahip olmamasından ötürü zorlu hava şartlarında hasar alabilir.
 - Elektriğin su yüzeyinden karaya iletimi sırasında güvenlik sorunları yaşanabilir [16].
 - Yüksek nem ve tuz faktörü sistem verimliliğini etkileyebilmekte ayrıca korozyona sebep olabilmektedir [16].
 - Yüzen platformların plastik esaslı oluşu su kalitesini düşürebilmektedir [5]. İçme ve sulama suyu olarak kullanılan kaynaklarda plastik esaslı dubalardan ayrışacak mikroplastiklerin arıtılması için fiziksel (kum filtre, disk filtre vb.), kimyasal (koagülasyon/flokülasyon, adsorpsiyon, fotodegradasyon vb.) veya biyolojik (klasik aktif çamur, MBR vb.) arıtma sistemlerine ihtiyaç duyulabilir [17]. Bu da ekstra zahmet ve maliyet getirmektedir.
 - Balıkçılık ve ulaşım faaliyetlerine kurulu olduğu alanda engel olabilir [5].
 - Uzun vadede su ekosisteminde farklılıklar gözlemlenebilir [5].

IV. YÜZEN GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNİN ÇEVREYE OLAN KATKILARI

Dünya'nın enerji ihtiyacının büyük bir çoğunluğunu karşılayan fosil yakıtlar bu süreçte havaya CO₂ ve birçok zehirli gaz salınımı yaparak hava kirliliğine sebep olmaktadır. Yıllardır artarak devam bu kirlilik küresel ısınmaya ve iklim değişikliklerine sebep olmaktadır. 2021 verilerine göre Dünya genelinde 37124 milyon ton CO₂, Türkiye'de ise 446 milyon ton CO₂ salınımı gerçekleşmiştir [18]. CO₂ salınımı her geçen artmaya devam etmektedir. Yenilebilir bir enerji kaynağı olan yüzen güneş enerjisi sistemleri de temiz ve çevre dostu enerji üretimine olanak sağlamaktadır. Yapılan çalışmalarda güneş enerjisi sistemlerinin salınan CO₂ miktarını 0,5-1 kg/kWh aralığında azalttığı raporlanmıştır [19, 20]. Kore'de yapılan bir proje göstermiştir ki 1 MW kapasitesindeki YGES projesi ile 971 MWh enerji üretimi yapıldığı ve havanın yıllık 471,21 ton CO₂'ten korunduğu tespit edilmiştir [21].

Dünya'nın %71'i sularla kaplıdır. Bu suyun %97,5'u tuzlu su, %2,5'u ise tatlı sudur. Ancak tatlı suyun sadece %0,5'i kullanılabilir durumdadır [22]. Kullanılabilir suyun yeryüzündeki temel kaynakları olan göllerden, barajlardan, nehirlerden her sene buharlaşma sebebiyle büyük ölçüde su kayıpları yaşanmaktadır. Avustralya'da yapılan bir çalışmaya göre açık bir rezervuarda bulunan suyun %40'ının buharlaşma sebebiyle kaybedilebileceği tespit edilmiştir [23].

Türkiye'de yapılan bir çalışmaya [24] göre su kaynaklarında yaşanan toplam su kaybının %90'ının buharlaşma kaynaklı olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmada Türkiye'de ele alınan 352 su kaynağından (129 göl, 252 baraj ve rezervuar) buharlaşma sebebiyle yılda $6,8 \times 10^9$ m³ su kaybedildiği hesaplanmıştır. Bu miktar, yeraltı su kaynaklarından sağlanan su miktarından (6×10^9 m³) ayrıca evsel ($5,7 \times 10^9$ m³) ve endüstriyel (4×10^9 m³) kullanıma harcanan su miktarlarından bile fazladır [24]. YGES'ler bulunduğu su kaynağı yüzeyine yaptığı perdeleme etkisi ile güneş ışınları ve havayla temasını kesip suyu serin tutarak buharlaşma ile kaybedilen su miktarını azaltmaktadır. Buharlaşmayı doğal göllerde %33, yapay göllerde %50 oranında azaltabilmektedir [5]. Sulama kanalları ve küçük akarsularda ise buharlaşmada %70'e varan düşüşler sağlayabilmektedir [14].

Türkiye'de ilk YGES projesinin gerçekleştirildiği 43 km² yüzey alanına sahip Büyükçekmece Gölü'nden buharlaşma sebebiyle kaybedilen su miktarı yılda $24,977 \times 10^6$ m³ olarak verilmiştir [24]. Büyükçekmece Gölü'nün sadece %1'lik kısmına (0,43 km²) YGES kurulduğunu düşünürsek ve bu kurulu alandan buharlaşma ile yaşanan su kaybının %33 azaldığını varsayarsak (buharlaşmanın tüm yüzey alanında eşit olduğu kabul edilmiştir.) yılda $82,42 \times 10^3$ m³ su kaybı önlenmiş olur. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre Türkiye'de bir kişi günlük ortalama 228 litre su tüketmektedir. Buna göre yılda tükettiği su miktarı 83,22 m³'e denk gelmektedir. Buharlaşma ile kaybı önlenen su miktarı ($82,42 \times 10^3$ m³), bir kişinin yıllık su tüketim miktarına (83,22 m³) bölüldüğünde 990 kişinin yıllık su ihtiyacını karşılayacak kadar suyun buharlaşma yoluyla kaybının önlenilebileceği görülür.

Ayrıca YGES'ler su yüzeyine yaptığı gölgeleme etkisiyle su kirliliğine sebep olan, birçok endüstriyel ve tarımsal faaliyette zorluk çıkaran alg popülasyonunu düşürerek su kalitesini ve temizliğini arttırmaktadır.

V. TÜRKİYE BARAJLARININ YÜZEN GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ

Türkiye'de artan nüfus ve gelişen sanayi ile birlikte enerji ve su tüketimi giderek artmaktadır. Enerji üretiminin büyük bir kısmını tükenmekte olan fosil yakıtlar ile gerçekleştiren Türkiye, sanıldığı kadar aksine su zengini bir ülke konumunda da değildir. Türkiye'de 2022 yılı verilerine göre 328,9 TWh olan elektrik üretimi, 326,2 TWh olan elektrik tüketiminin gerisinde kalmıştır [25]. Ayrıca 112 milyar m³ (yer üstü 94 milyar m³, yer altı 18 m³) su potansiyeline sahip olan Türkiye, bu kullanılabilir su potansiyelinin 44 milyar m³'ünü sulamada, 13 milyar m³'ünü ise içme, kullanma ve sanayide kullanmaktadır. Kişi başına düşen kullanılabilir yıllık su miktarı 2000 yılında 1652 m³, 2009 yılında 1544 m³, 2020 yılında 1346 m³, 2022 yılında ise 1313 m³ olmuştur [26]. Görüldüğü üzere Türkiye her geçen sene su kıtlığı artan bir ülke haline gelmektedir. Bu bölümde enerji üretimi ve su temini olmak üzere iki temel amaca hizmet eden barajlara

kurulacak yüzen güneş enerjisi sistemlerinin Türkiye potansiyelinden bahsedilecektir.

Yer üstü su kaynaklarından biri olan barajlar enerji üretimi, içme-sulama suyu sağlama ve taşkın koruma gibi birçok amaca hizmet etmektedir. DSİ verilerine göre Türkiye 861 adet baraj ve 714 tane hidroelektrik santraline (HES) sahip olup bu HES'ler toplam 31384,18 MW kurulu güce sahiptir. Bu HES'ler sayesinde yılda 107801,82 GWh/yıl yenilenebilir enerji üretimi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca mevcut tüm barajlar 4189577 hektar alanın sulanmasını ve 3370,90 h³/yıl içme suyu temini sağlamaktadır [27].

Önemli su kaynaklarından olan baraj gölleri üzerine kurulacak yüzen güneş enerjisi sistemleri ile bu yapılar daha da işlevsel hale getirilebilmektedir. Su seviyesi değişimlerine uyum sağlayabilen YGES'lerin, HES'lerle kombinasyonu sayesinde hali hazırda yenilenebilir enerji üretimi sağlayan barajların güneş enerjisinden de faydalanarak çevre dostu enerji üretimi artırılabilir. Bunun yanı sıra YGES'lerin suda oluşturduğu gölgeleme sayesinde baraj suyunun serin kalması sağlanarak buharlaşma ile kaybedilen su miktarı %50 oranında azaltılabilmekte, bu sayede baraj göllerinin korunmasına katkı sağlanabilmektedir.

Türkiye'nin en büyük yüzey alanına sahip 5 baraj gölüne sahip olan Atatürk Barajı, Keban Barajı, Karakaya Barajı, Ilısu Barajı ve Hirfanlı barajı ele alındığında bu barajlar üzerine kurulacak farklı yüzey alanlarına kurulacak YGES'lerin yaklaşık ne kadar enerji üretebileceği hesaplanmıştır.

Potansiyel YGES güçleri, maliyet-güç üretimi optimizasyonu göz önünde bulundurularak 2279x1134x35 mm boyutlarında 545 watt maksimum güce sahip monokristal fotovoltaik panellere göre ve diğer kullanım alanları kayıplarını da göz önüne alarak enerji üretimi sağlayan etkin alanın %75 olması kabulüyle belirlenmiştir. Üretilen yıllık enerji miktarları Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır [28, 29]. Enerji üretim miktarları iklim şartları, güneş alma süresi, arazi topoğrafyası, sistem hasar ve arızaları vb. gibi durumlara göre değişkenlik gösterebilmektedir.

$$E = A \times r \times H \times PR \quad (1)$$

E: yıllık enerji kapasitesi (kWh)

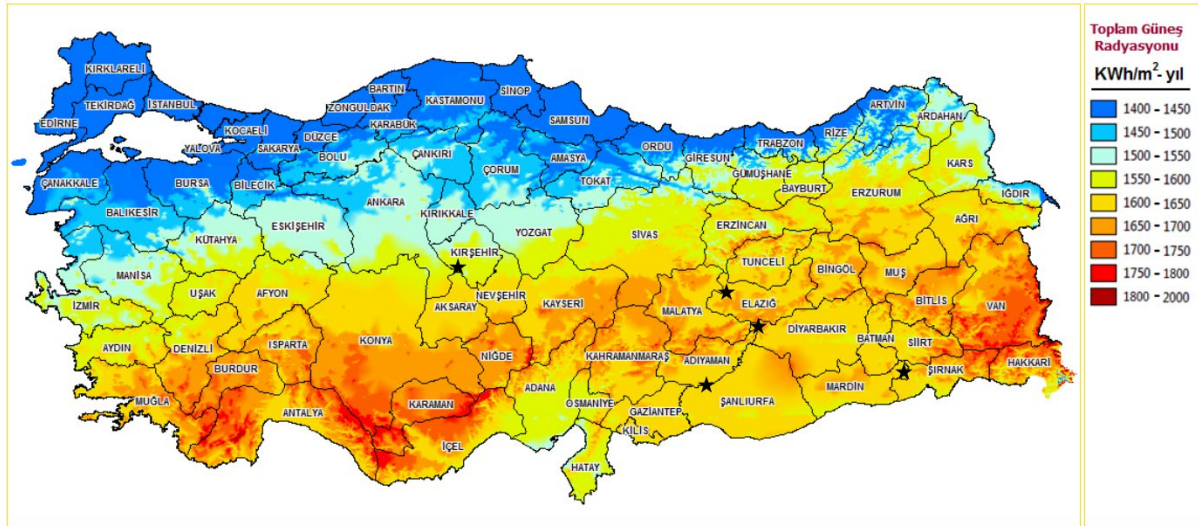
A: toplam güneş paneli alanı (m²)

r: güneş paneli verimliliği (%)

H= toplam yıllık güneş radyasyonu (kWh/m²)

PR= performans oranı (%)

Hesaplarda kullanılan 545 watt maksimum güce sahip monokristal fotovoltaik panellerin verimliliği %20'dir. Gölgeleme, tozlanma, yansıma, sıcak, ışınlım, kablo ve çevirici kayıpları vb. ile belirlenen performans oranı standart değer olan %75 olarak alınmıştır [29, 30]. Yıllık güneş radyasyon değerleri Enerji İşleri Genel Müdürlüğü [31] verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Yıllık güneş radyasyonu değerlerini gösteren harita Şekil 7'de gösterilmiştir.



*Yıldızlar barajların bulunduğu yerleri temsil etmektedir.

Şekil 7. Türkiye yıllık güneş radyasyonu haritası [31]

Hesaplanan potansiyel YGES güçleri ve yıllık enerji değerleri, mevcut olan HES kurulu güçleri ve yıllık

ortalama enerji değerleriyle birlikte Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Türkiye'nin en büyük yüzey alanına sahip 5 barajının mevcut HES ve potansiyel YGES kapasiteleri

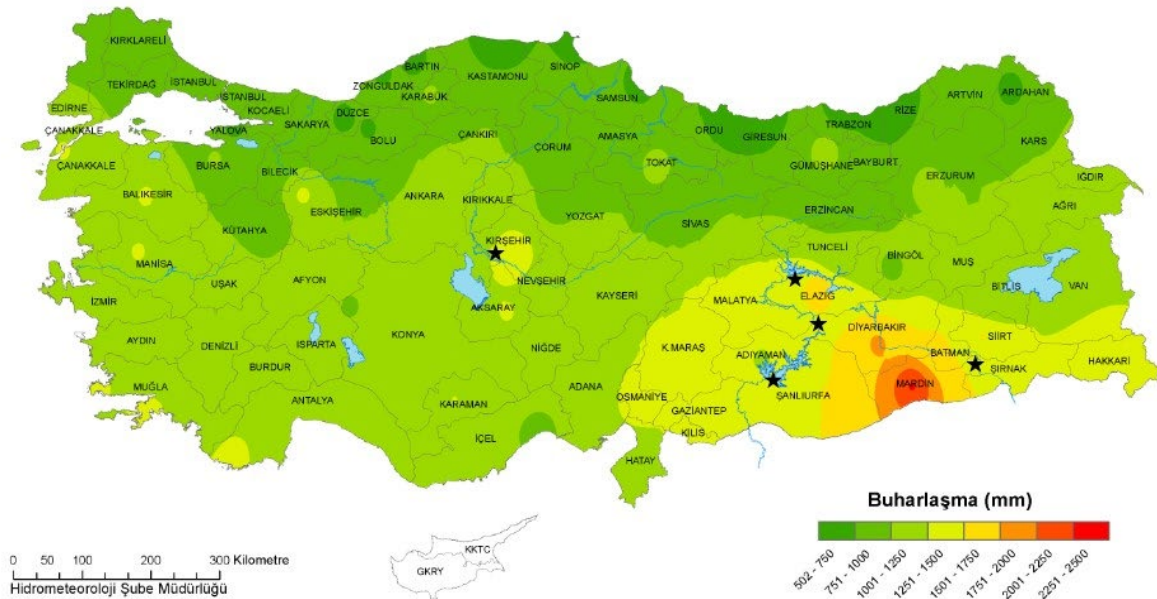
Baraj Adı	Bulunduğu Yer	Yüzey Alanı (km ²)	Mevcut HES Gücü (GW)	HES Yıllık Ort. Enerji (GWh/yıl)	Potansiyel YGES Gücü (GWp)			Ortalama yıllık güneş radyasyonu (H) (kWh/m ²)	Yıllık Ort. Enerji (GWh)		
					YGES alanı yüzdesi				YGES alanı yüzdesi		
					0,10%	0,50%	1%		0,10%	0,50%	1%
Atatürk Barajı	Şanlıurfa	817	2,40	8900	0,13	0,65	1,29	1587,14	145,88	729,39	1458,78
Keban Barajı	Elâzığ	675	1,33	6600	0,11	0,53	1,07	1579,55	119,95	599,74	1199,47
İhsu Barajı	Mardin	313	1,20	4120	0,05	0,25	0,50	1585,17	55,82	279,09	558,18
Karakaya Barajı	Diyarbakır	268	1,80	7354	0,04	0,21	0,42	1596,27	48,13	240,64	481,28
Hirfanlı Barajı	Kırşehir	263	0,13	400	0,04	0,21	0,42	1510,81	44,70	223,51	447,01
Toplam		2336	6,86	27374	0,37	1,85	3,69	7858,94	414,47	2072,36	4144,72

Tabloda verilen 5 barajın HES'leri tarafından üretilen toplam 27374 GWh/yıl enerji ile yaklaşık 7400000 kişinin günlük tüm elektrik ihtiyacı (kişi başına günlük 3700 kW) karşılanabilmektedir. Buna ek olarak sadece %0,1'lik alana YGES kurulduğu da düşünülürse toplam 414,47 GWh/yıl daha fazla enerji üretimine olanak sağlanmış olur. Bu da 112018 kişinin daha günlük tüm elektrik ihtiyacının karşılanabileceği anlamına gelmektedir.

Son yıllarda küresel ısınmanın sebep olduğu iklim değişiklikleri ve kuraklıkla beraber bilinçsiz yapılan su tüketimi barajlardaki su miktarını ciddi anlamda düşürmektedir. Bunun yanı sıra buharlaşma sebebiyle

de büyük miktarlarda su kaybı yaşanmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi yüzen güneş enerjisi sistemleri kurulduğu alandaki su yüzeyini kaplayan bir perde görevi göerek suyu serin kalmasını sağlayıp buharlaşma ile kaybedilen su miktarını azaltmaktadır. Barajlar gibi yapay göllerde buharlaşmanın %50 oranında azaldığı gözlemlenmiştir [5].

Şekil 8' de verilen Türkiye açık yüzey buharlaşma normalleri haritasına göre ele alınan barajlar buharlaşmanın yoğun olduğu bölgelerde bulunmaktadır. Buharlaşma ile kaybedilecek su kaybının azaltılması bu bölgelerde daha büyük önem arz etmektedir.



*Yıldızlar barajların bulunduğu yerleri temsil etmektedir.

Şekil 8. Türkiye açık yüzey buharlaşma normalleri haritası [32]

Ele alınan barajlar için buharlaşma ile kaybolan yaklaşık su miktarları ve farklı alanlara sahip YGES'ler

sayesinde barajlardan buharlaşma ile kaybı önlenen tahmini su miktarları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Türkiye'nin en büyük yüzey alanına sahip 5 barajının yaklaşık buharlaşma değerleri ve YGES'lerle buharlaşması önlenen tahmini su miktarları

Baraj Adı	Bulunduğu Yer	Yüzey Alanı (km ²)	Yıllık Açık Yüzey Buharlaşma Normalleri (mm)	Yaklaşık Buharlaşma (10 ⁶ m ³ /yıl)	Buharlaşması Önlenen Tahmini Su Miktarı (10 ⁶ m ³ /yıl)		
					YGES Kurulu Yüzey Alanı Yüzdesi		
					0,1%	0,5%	1%
Atatürk Barajı	Şanlıurfa	817	1400	1143,80	0,57	2,86	5,72
Keban Barajı	Elâzığ	675	1300	877,50	0,44	2,19	4,39
Iısu Barajı	Mardin	313	1400	438,20	0,22	1,10	2,19
Karakaya Barajı	Diyarbakır	268	1400	375,20	0,19	0,94	1,88
Hirfanlı Barajı	Kırşehir	263	1200	315,60	0,16	0,79	1,58
Toplam				3150,30	1,58	7,88	15,75

*Buharlaşma değerleri Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2022 yılı açık yüzey buharlaşma değerlendirmesi [32] ve [24]'deki verilerden faydalanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 2'den görüldüğü üzere toplam yüzey alanının %0,1'lik kısmına kurulacak YGES ile 1,58x10⁶ m³/yıl suyun buharlaşma ile kaybının önlenebileceği tahmin edilmektedir. Bu değer 2022 yılı kişi başına düşen yıllık su miktarına (1313 m³) oranlandığında 1203 kişiye denk gelen su miktarı kadar suyun buharlaşma ile kaybı önlenebileceği görülmektedir.

VI. SONUÇ

On yılı aşkın süredir su kaynaklarına kurulan yüzen güneş enerjisi sistemleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Çok yönlü, işlevsel, verimli, uygulanabilir ve çevreci bir enerji sistemi olması yüzen güneş enerjisi sistemlerini öne çıkarmaktadır.

Herhangi bir kara parçasına ihtiyaç duyulmaması bu sayede değerli arazilerin kaybını önlemesi bu sistemlerin en büyük özelliklerindedir. Suyun doğal soğutma etkisi sayesinde karasal sistemlere göre %10-15 daha fazla enerji üretimi potansiyeline sahiptir. Yenilenebilir bir enerji kaynağı olması CO₂ salınımını azaltmaktadır. Ayrıca su kaynaklarından buharlaşma ile kaybedilen su miktarını azaltarak su kaynaklarının korunmasına yardımcı olmaktadır. Tarımsal sulamanın ve buharlaşmanın arttığı yaz aylarında bu sisteme sahip su kaynaklarında büyük miktarlarda su kazanı sağlanabilir.

Zorlu hava şartları, yüksek nem, enerji transferin sırasında oluşabilecek güvenlik sorunlarına tasarım ve uygulama aşamasında mutlaka dikkat edilmeli, korozyona ve UV ışınlarına dayanıklı, mukavemeti yüksek malzemeler seçilmelidir. Yüzen sistemlerin kurulum ve bakım masrafları karasal sistemlere göre daha yüksektir. Ancak maliyetler arasındaki fark her

geçen yıl pazar büyüklüğünün artmasıyla azalmaktadır. Ayrıca arazi masrafının olmaması ekonomik bir avantaj sağlamaktadır.

Enerji ve su ihtiyacının giderek arttığı Türkiye'de yüzen güneş enerjisi sistemleri ile çevre dostu enerji üretimi sağlayıp enerjide dışa bağımlılığı azaltmaya, suların korunmasına katkıda bulunulabilir. Barajlara kurulacak yüzen güneş enerjisi sistemleri barajların işlevselliğini arttırmaktadır. Bu HES-YGES kombinasyonu daha fazla yenilenebilir enerji üretimine olanak sağlamakla birlikte, barajlarda suyun korunmasına da birçok katkı sağlamaktadır. Türkiye'deki barajlara kurulacak bu sistemlerin önemli bir potansiyelinin olduğu düşünülmektedir.

Çevreye olan katkıları, enerji verimliliği, teknolojinin gelişmesi, bu sistemlere yapılan yatırım ve teşviklerin artması ve izlenen politikalar yüzen güneş enerjisi sistemlerine olan talebi gün geçtikçe arttırmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Energy Institute, Statistical Review of World Energy 72nd Edition, 2023.
- [2] TMMOB Makine Mühendisleri Odası Enerji Çalışma Grubu, Türkiye Enerji Görünümü 2023 Sunumu. <https://enerji.mmo.org.tr/wp-content/uploads/2020/05/TurkiyeEnerjiSorunumuSunumu2020.pdf> (Mayıs 2023).
- [3] Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Kaynakları <https://eusolar.ege.edu.tr/tr-3482/yenilenebilir-enerji-kaynaklari.html>

- [4] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Bilgi Merkezi-Enerji- Güneş, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes>. (Ağustos 2022).
- [5] Alok S., Neha Y., Sudhakar K. (2016). Floating photovoltaic power plant: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 815-824.
- [6] Düzenli M., Koçar G., Eryaşar A., A Review Of Floating Solar Power Plants. *SolarTR 2018 Conference & Exhibition*, 281-287, İstanbul, Türkiye, 29-30 November 2018.
- [7] WorldBank, ESMAP, SERIS, Where Sun Meets Water Floating-Solar Market Report Executive Summary, 2018.
- [8] Silalahi D.F., Blakers A. (2023), Global Atlas of Marine Floating Solar PV Potential, *Solar 2023*, 3(3), 416-433.
- [9] Trapani K., Santafe M. R. (2014). A Review of Floating Photovoltaic Installations: 2007–2013, *Progress In Photovoltaics: Research and Applications*. 24, 524-532.
- [10] Enerji Atlası, İstanbul Büyükçekmece Gölü Yüzer Güneş Enerjisi Santrali, <https://www.enerjiatlası.com/gunes/buyukcekmece-golu-yuzer-g%C3%BCnes-enerji-santrali.html>
- [11] Gamarra C. Ronk J. J. (2019). Floating Solar: An Emerging Opportunity at the Energy-Water Nexus, *Texas Water Journal*, 10, 32-45.
- [12] Power Technology, World Biggest Floating Solar Farms, <https://www.power-technology.com/features/worlds-biggest-floating-solar-farms>
- [13] Choi Y. K. (2014). A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact. *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 8, 75-84.
- [14] Sen D., Design Parameters of 10kW Floating Solar Power Plant. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 2, May 2015.
- [15] Tina G.M., Rosa Cloy M., Rosa Clot P., Electrical Behavior and Optimization of Panels and Reflector of a Photovoltaic Floating Plant, *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, January 2011.
- [16] Kumar V., Shrivastava R.L., Untawale S.P. (2015). Solar Energy: Review of Potential Green & Clean Energy for Coastal and Offshore Applications. *Aquatic Procedia*, 4, 473-480.
- [17] Köker B., Cebeci M.S., Yılmaz Z., Selçuk S.F. (2022). Mikroplastiklerin Atıksu Arıtma Tesislerindeki Etkileri ve Arıtma Yöntemleri. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 5(2), 84-91.
- [18] Global Carbon Atlas. CO₂ Emissions, <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>
- [19] De Marco A., Petrosillo I., Semeraro T., Pasimeni M. R., Aretano R., Zurlini G. (2014). The contribution of Utility-Scale Solar Energy to the global climate regulation and its effects on local ecosystem services. *Global Ecology and Conservation*, 2, 324-337.
- [20] Tsoutsos T., Frantzeskaki N., Gekas V. (2005). Environmental Impacts from The Solar Energy Technologies. *Energy Policy*, 33, 289-296.
- [21] Song J., Choi Y. (2016). Analysis of the Potential for Use of Floating Photovoltaic Systems on Mine Pit Lakes: Case Study at the Ssangyong Open-Pit Limestone Mine in Korea. *Energies*, 9, 1-13.
- [22] TÜBİTAK Bilim Genç, Dünya'daki Su, <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/dergimiz/dunyada-ki-su>
- [23] Helfer F., Lemckert C., Zhang H. (2012). Impacts of climatechange on temperature and evaporation from a large reservoir in Australia. *Journal of Hydrology*, 475, 265-378.
- [24] Gökbülak F., Özhan S. (2006). Water loss through evaporation from water surfaces of lakes and reservoirs in Turkey. *Official Publication of the European Water Association (EWA)*.
- [25] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Bilgi Merkezi-Enerji-Elektrik, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> (Ağustos 2023).
- [26] Devlet Su İşleri, Toprak Su Kaynakları, <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/754>
- [27] Devlet Su İşleri, İllere Göre Yapımı Tamamlanan Barajlar ve Faydaları 1936-2019, 2020.
- [28] Radosevic N., Liu G.J., Tapper N., Zhu X., Sun Q. (2022). Solar Energy Modeling and Mapping for the Sustainable Campus at Monash University, *Frontiers in Sustainable Cities*, Volume 3.
- [29] Sunbase, Photovoltaic Software, How to calculate solar energy power of PV systems <https://photovoltaic-software.com/principle-resources/how-calculate-solar-energy-power-pv-systems> (Şubat 2022).
- [30] Deniz E., Güneş Enerjisi Santrallerinde Kayıplar, Akademi Enerji, İzmir.
- [31] Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA), <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator>
- [32] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2022 yılı Açık Yüzey Buharlaşma Değerlendirmesi, <https://www.mgm.gov.tr/arastirma/buharlasma.aspx?s=2022>

Üç Boyutlu ve Katmanlı Bakır Organodifosfonat Koordinasyon Polimerinin Sentezi, Karakterizasyonu, Katalitik ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi

Synthesis, Characterization, Investigation of Catalytic and Thermal Properties of Three-Dimensional and Layered Copper Organodiphosphonate Coordination Polymer

Burak AY ¹ 

¹Çukurova Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Adana, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, (1,4-fenilenbis(metilen))bis(fosfonik asit) ligandı (H₄L) ve katmanlı yapıya sahip bakır organodifosfonat polimeri, [Cu₂(C₈H₈O₆P₂)(H₂O)₂]_n (**1**), sentezlenmiştir. Sentezlenen bileşiklerin yapıları çeşitli spektroskopik ve analitik yöntemler kullanılarak karakterize edilmiştir. Tek kristal X-ışını analizi sonucunda **1** nolu bileşiğin üç boyutlu ve sütunlu tabaka yapısında organik/inorganik katmanlardan oluştuğu gözlenmiştir. Monoklinik kristal sistemi ve P2₁/c uzay grubunda olan bileşik **1**'in hücre parametreleri $a = 10.8142(9) \text{ \AA}$, $b = 7.5839(6) \text{ \AA}$, $c = 7.3991(6) \text{ \AA}$, $V = 606.26(9) \text{ \AA}^3$ ve $Z = 4$ 'tür. Polimer zinciri içinde her bir bakır atomu toplam beş koordinasyona sahip olup kısmen bozulmuş kare piramit geometriye sahiptir. **1** polimerinin heterojen katalitik aktivitesi ve termal özellikleri incelenmiştir. Termogravimetrik (TG) analiz sonucunda katalizörün 200 °C sıcaklığa kadar termal kararlılığa sahip olduğu gözlenmiştir. Tert bütül hidroperoksit (TBHP) kullanarak 60 °C sıcaklıkta ve 12 saat sonunda %92.37 timol dönüşümü meydana gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bakır organodifosfonat, hidrotermal sentez, koordinasyon polimeri, timokinon

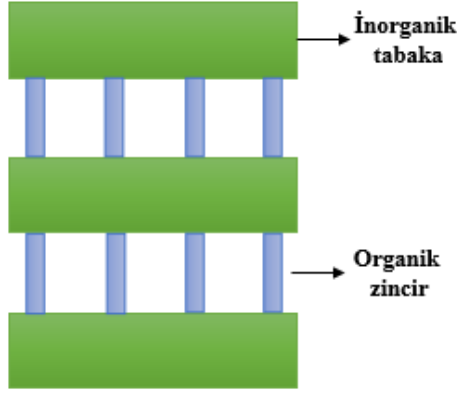
Abstract

In this study, (1,4-phenylenebis(methylene))bis(phosphonic acid) ligand (H₄L) and its pillared layered copper organodiphosphonate polymer, [Cu₂(C₈H₈O₆P₂)(H₂O)₂]_n (**1**), have been synthesized. The structures of the synthesized compounds have been characterized using various spectroscopic and analytical methods. As a result of single crystal X-ray analysis, compound **1** consists of organic/inorganic layers in a three-dimensional and columnar layer structure. This compound crystallizes in the monoclinic space group P2₁/c, with cell parameters, $a = 10.8142(9) \text{ \AA}$, $b = 7.5839(6) \text{ \AA}$, $c = 7.3991(6) \text{ \AA}$, $V = 606.26(9) \text{ \AA}^3$ and $Z = 4$. Each copper atom in the polymeric chain has a total of five coordination and is in a partially distorted square pyramid geometry. The heterogeneous catalytic activity and thermal property of **1** have been investigated. Thermogravimetric (TG) analysis showed that the catalyst has thermal stability up to 200 °C. By using tert-butyl hydroperoxide (TBHP), 92.37% thymol conversion occurred at 60 °C and after 12 hours.

Keywords: Copper organodiphosphonate, hydrothermal synthesis, coordination polymer, thymoquinone

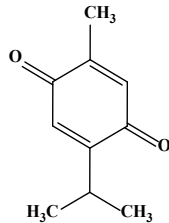
I. GİRİŞ

Metal organik kafes yapılar (MOFs) olarak bilinen organik-inorganik hibrit bileşikler polifonksiyonel organik ligandların metal atomlarına bağlanmaları ile elde edilen küme yapılarıdır [**1**]. Kafes yapısı içindeki inorganik bileşen elektriksel hareketlilik, manyetik, optik veya dielektrik özellikler, mekanik sertlik ve termal kararlılık sağlarken, organik bileşen işlenebilirlik, yapısal çeşitlilik, polarize edilebilirlik ve lüminesans gibi özellikler sunabilmektedir [2, 3]. Bu farklı özelliklerin bir araya gelmesi sonucunda yeni tip malzemelerin üretimi yapılabilmektedir. Son yıllarda bu yapıların artan ilgisi, teknolojik uygulamalar için yapısal olarak çok yönlü özelliklere sahip yeni fonksiyonel malzemelerin tasarımından kaynaklanmaktadır. Bu özelliklere sahip MOF yapıları, Yaghi [4-7], Ferey [8, 9], Kitagawa [10, 11] ve arkadaşları tarafından kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Organik-inorganik hibrit ailesinin bir diğer üyesi de metal organofosfonatlardır. Fosfonatlar, tipik olarak katmanlı ve "sütunlu katman" malzemeleri oluşturan bir ligand türüdür [12]. Organodifosfonat ligandlarından üretilen "sütunlu tabaka" malzemeleri, alternatif organik ve inorganik alanlara sahip üç boyutlu kafes yapılarıdır (**Şekil 1**). Bu özelliklere sahip metal organodifosfonatların kataliz, iyon değişimi, manyetizma, iyon adsorpsiyonu, gaz depolama ve lüminesans gibi alanlarda uygulamaları bulunmaktadır [13-15].



Şekil 1. Metal difosfonattaki katmanlı motifin şematik gösterimi

Çalışma kapsamında sentezlenen bakır organodifosfonat polimerinin timolün timokinona oksidasyonundaki katalitik aktivitesi araştırılmıştır. $C_{10}H_{12}O_2$ (2-izopropil-5-metil-1,4-benzokinon) kapalı formülüne sahip olan timokinon bileşiği (Şekil 2) çörekotu yağının temel biyoaktif bileşenidir ve 2000 yılı aşkın süredir antioksidan, antidiyabetik [16], anti-inflamatuvar ve antineoplastik ilaç olarak kullanılmaktadır [17]. *Ranunculaceae* familyasına mensup ve çoğunlukla Akdeniz'e kıyısı olan ülkelerde yetişen otsu bir bitki olan ve halk arasında bilinen adıyla çörekotu, *Nigella sativa* türü bitkilerin kapsül içerisinde oluşan tohumudur [18].



Şekil 2. Timokinonun kimyasal yapısı

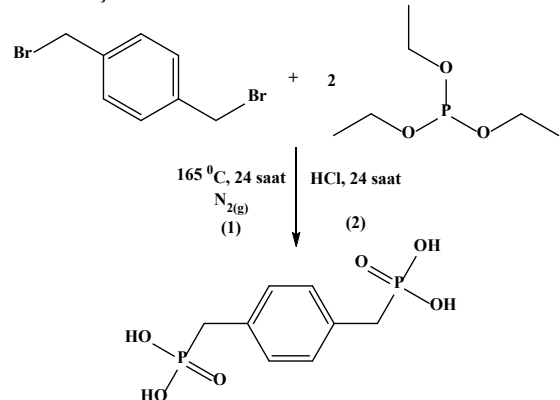
Timokinonun antinosiseptik özelliği [19], tüberküloz tedavisi esnasında karaciğer zehirlenmesini önlemede [20], cilt mantarı enfeksiyonlarının tedavisinde [21], kolon [22], meme, mide, [23], prostat kanserleri üzerinde hücre büyümesini engellediği [24] ve kemoterapi ilaçlarına alternatif olarak kullanılabilirliği çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir [25]. Timokinonun çörek otu yağından ekstrakte edilip saflaştırılması zahmetli ve zordur. Ayrıca oldukça pahalı bir bileşiktir. Bu nedenle ucuz bir bileşik olan timolden yola çıkılarak katalizör ortamında timokinon elde edilmesi hedeflenmiştir. Ülkemizde üretimi olmayan ancak başta kanser olmak üzere birçok değişik hastalığın tedavisinde kullanılabilirliği ispatlanmış olan timokinon bileşiğinin üretimini gerçekleştirerek farklı araştırmalarda bu maddenin kullanılabilirliğini sağlamak çalışmanın ana odak noktasını oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, (1,4-fenilenbis(metilen))bis(fosfonik asit) ligandı (H_4L) ve katmanlı yapıya sahip bakır organodifosfonat polimeri, $[Cu_2(C_8H_8O_6P_2)(H_2O)_2]_n$ (1), sentezlenmiştir. Bileşiklerin yapılarının aydınlatılmasında elementel analiz, FTIR, NMR, ICP-OES ve X-ışını difraktometresi kullanılmıştır. 1 polimerinin timol oksidasyonu üzerindeki heterojen katalitik aktivitesi ve termal özellikleri araştırılmıştır.

II. MATERYAL VE METOD

2.1 Materyal

H_4L ligandı dışında kullanılan tüm kimyasallar herhangi bir saflaştırma işlemi yapılmadan ticari olarak satın alınmıştır. Trietil fosfit (%98), hidrojen peroksit (H_2O_2) (%30), TBHP (%80), timol (≥ 98.5), asetonitril (%99.8-GC) ve diklorometan (%99.8-GC) Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir. HCl (%37), $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (%99) ve HNO_3 (%65) Merck firmasından, 1,4-bis(bromometil)benzen (>97) TCI Chemicals, susuz Na_2SO_4 (%99) Tekkim firmasından satın alınmıştır. Mikroanaliz çalışmaları Thermo Flash 2000 CHNS marka elementel analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir. İnfrared analizleri Perkin Elmer Frontier FTIR cihazı ile yapılmıştır. Bakır ve fosfor analizlerinde Perkin-Elmer Optima 2100DV ICP-OES cihazı kullanılmıştır. $^1H/^{13}C/^{31}P$ NMR analizleri yüksek çözünürlüklü Bruker Avance 300 MHz NMR cihazı kullanılarak yapılmıştır. TG analizleri azot atmosferi altında dakikada $5^\circ C$ sıcaklık artışında Perkin Elmer TGA 8000 cihazı ile $30-1000^\circ C$ sıcaklık aralığında yapılmıştır. GC/MS analizleri TR5MS kapiler kolona sahip Thermo Brand marka kromatografi cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Tek kristal X-ışını analizi oda sıcaklığında ($296 K$) grafit-monokromatik $Mo-K\alpha$ radyasyonu ile donatılmış bir Bruker D8-QUEST difraktometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Polimerik yapı, SHELXS-2013 [26] kullanılarak doğrudan yöntemlerle çözülmüş ve SHELXL-2013 [27] kullanılarak F^2 üzerinde tam matris en küçük kareler yöntemi kullanılarak düzeltmeler yapılmıştır. Analiz sırasında veri toplama işlemlerinde Bruker APEX2 [28], moleküler grafikler için Mercury ve WinGX programları kullanılmıştır. Polimere ait detaylı kristal verileri **Tablo 1**, seçilen bağ açıları ve bağ uzunlukları ise **Tablo 2**'de özetlenmiştir.



Şekil 3. H_4L ligandının genel sentez şeması

2.2 Ligand (H₄L) Sentezi

Literatürde rapor edilen yöntemin kısmen modifiye edilmesi ile organodifosfonat ligandının sentezi gerçekleştirilmiştir (**Şekil 3**) [29]. Üç boyunlu bir balona 1,4-bis(bromometil)benzen (7.60 mmol, 2.00 g) tartıldı. Balon içerisinden azot gazı geçirilerek trietil fosfit (5.0 mL) damla damla ilave edilerek 165 °C'de 24 saat kaynatıldı (**1**). Bir gün sonunda reaksiyon karışımı soğutuldu ve oluşan dietil esteri alınarak vakum altında destile edildi. Daha sonra balona derişik HCl (50 mL) asit eklendi ve 24 saat boyunca kaynatıldı (**2**). Elde edilen beyaz katı madde saf suda yeniden kristallendirildi. Oluşan beyaz kristaller süzülde ve oda sıcaklığında kurutuldu (Verim: %78, 1.57 g). Elementel Analiz (C₈H₁₂O₆P₂): Teorik: C, 36.11; H, 4.55. Deneysel: C, 36.04; H, 4.58%. ICP-OES: Teorik: P: 23.28%. Deneysel: P: 23.10%. FTIR data (cm⁻¹): 3200-3000(s), 2328(s), 1513(m), 1264(s), 1231(m), 1114(s), 1090(s), 998(s), 942(s), 803(s), 749(s), 558(s), 427(s). ³¹P NMR (D₂O): Singlet 24.70 ve 33.20 ppm. ¹H NMR (D₂O, δ): 7.17 (s, 1H, Ar-CH), 4.71 (s, 1H, P-OH), 3.09 (s, 1H, P-CH₂), 3.04 (s, 1H, P-CH₂). ¹³C NMR (D₂O, δ): 131.30, 129.74, 34.49.

2.3 Katalizör (1) Sentezi

CuSO₄·5H₂O (0.055 g, 0.22 mmol) ve H₄L (0.030 g, 0.11 mmol) 6 mL saf suda çözüldü. Açık yeşil renkli çözeltinin pH değeri %10 HNO₃ çözeltisi ile 1.05 değerine sabitlendi. Daha sonra homojen çözelti karışımı 23 mL hacimli PTFE kaplı Parr asit reaktöre yerleştirildi. Çözelti karışımı 140 °C sıcaklığında 72 saat ısıtıldı. Tepkime sonunda reaktörün kademeli olarak oda sıcaklığına kadar gelmesi beklendi ve son çözeltinin pH değeri ölçüldü (pH: 0.98). Elde edilen açık yeşil kristaller süzülde ve saf su ile yıkanarak oda sıcaklığında kurutuldu (Verim: %55). Elementel Analiz (C₄H₆CuO₄P): Teorik: C, 22.60; H, 2.84%. Deneysel: C, 23.14; H, 2.66%. ICP-OES: Teorik: Cu: 29.89; P:14.57%. Deneysel: Cu: 28.71; P:13.86%. FTIR data (cm⁻¹): 3056(w), 3016(w), 2912(w), 1490(m), 1247(m), 1097(s), 1018(s), 988(s), 921(s), 771(s), 721(s).

2.4 Timolün Timokinona Oksidasyonu

Katalizör denemeleri oda sıcaklığında ve 60 °C sıcaklığında sıcaklık kontrollü manyetik karıştırıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oksidant olarak ise %30'luk H₂O₂ veya %80'lik TBHP kullanılarak performansları kıyaslanmıştır. Timol (0.42 g, 2.80 mmol) ilk olarak asetonitril (5 mL) içinde çözüldü. Daha sonra tepkime karışımına H₂O₂ (131 µL, 5.60 mmol) veya TBHP (540 µL, 5.6 mmol) eklendi. Son olarak heterojen katalizör **1** (6.0 mg, 14 µmol) ilave edilerek tepkime başlatıldı ve farklı tepkime sürelerinde (4, 8, 12 ve 24 saat) sürekli karıştırıldı. Her bir tepkime süresi sonunda ortamdan 100 µL örnek alındı ve uygun bir çözücü (H₂O₂ için asetonitril, TBHP için diklorometan) ile 5 mL'ye

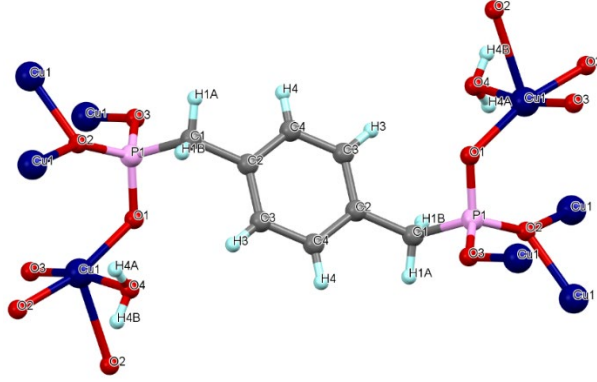
seyreltilde. Daha sonra çözelti susuz Na₂SO₄'tan geçirilerek GC/MS analizleri gerçekleştirildi.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Sentez ve Karakterizasyon

H₄L ligandının karakterizasyonu için elementel analiz, ICP-OES, FTIR ve ¹H/¹³C/³¹P NMR analizleri gerçekleştirilmiştir. Kristal olarak elde edilen ürünün elementel analiz ve fosfor analizleri sonucunda deneysel ve teorik değerlerin uyumlu olduğu görülmüştür. Liganda ait FTIR spektrumunda 3000-3200 cm⁻¹ arasındaki geniş gerilme bandı fosfonata bağlı olan ν(O-H) grubuna aittir. 3000 cm⁻¹'in altında gözlenen gerilme bandı fosfor atomuna bağlı alifatik ν(C-H) gruplarına ait sinyaldir. Parmak izi bölgesinde 950-1050 cm⁻¹ arasında gözlenen keskin bandlar ise organodifosfonat ligandına ait spesifik ν(P-O) gerilme titreşimlerine aittir (**EK 1**). ³¹P NMR analizi ile fosfonat ligandının oluştuğu desteklenmiştir (**EK 2**). 24.70 ppm'de gözlenen tekli güçlü sinyal kimyasal çevreleri özdeş olan fosfor atomlarına aittir. 33.20 ppm'de gözlenen küçük tekli sinyal ise ortamda kalan az miktarda trietil fosfite bulunan eş fosfor atomlarına ait sinyaldir [30]. Trietil fosfite bakır atomunun bağlanabileceği aktif bir grup olmadığı için polimer oluşumuna bir etkisi olmamıştır. Liganda ait ¹H NMR spektrumu incelendiğinde 7.17 ppm değerindeki tekli sinyal aromatik halkada bulunan CH protonlarına ait sinyaldir. 4.71 ppm değerinde görülen tekli sinyal fosfor atomlarına bağlı OH gruplarındaki protonlara ve 3.09 ppm'deki dublet sinyal ise fosfora bağlı alifatik CH₂ protonlarına ait sinyallerdir (**EK 3**). Ligandın ¹³C NMR spektrumunda 131.30 ve 129.74 ppm değerlerinde gözlenen sinyaller aromatik halkadaki karbonlara, 34.49 ppm'de gözlenen ise alifatik CH₂ karbonuna ait sinyallerdir (**EK 4**). Kompleksin yapısının aydınlatılmasında tek kristal X-ışını analizinin yanı sıra elementel analiz ve ICP-OES analizleri yapılmıştır. X-ışını analizi sonucunda belirlenen [Cu₂(C₈H₈O₆P₂)(H₂O)₂]_n kimyasal formüle ait elementel analiz ile fosfor ve bakır analizlerinin sonuçlarının teorik sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bakır organodifosfonat polimerinin moleküler yapısı **Şekil 4**'de verilmiştir. **1** polimerine ait tek kristal X-ışını yapı analizi sonucunda örneğin C₈H₁₂Cu₂O₈P₂ kimyasal formülünde olduğu görülmüştür. Monoklinik kristal sistemi ve P₂/c uzay grubunda olan kompleksin Z değerinin ise 4 olduğu analiz sonucunda belirlenmiştir. Üç boyutlu ve katmanlı bir yapıya sahip olan koordinasyon polimeri [Cu²⁺₂(L⁴⁻)(H₂O)₂]_n kapalı formülüne sahiptir. Tekrarlanan birimler fosfonat ligandı ve bakır atomlarından oluşmaktadır. +2 yüklü olan bakır iyonu fosfonat grubunda bulunan iki hidroksil ile eksi yük dengesini sağlamaktadır. Bakır atomları fosfonat gruplarında bulunan hem hidroksil grupları hem de P=O grubuna ait oksijen atomu ile koordine olmuştur. Bakır ve fosfor atomları bu oksijen köprüleri sayesinde polimerik yapıyı meydana getirmiştir. Fosfonat grubu çalışılan pH değerinde dört dışı şelat

gibi davranarak bakır atomları buradaki oksijen atomlarına koordine olmuştur. Tekrarlanan yapıda bakır atomlarına ayrıca bir mol H₂O molekülü koordine olarak toplamda beş koordinasyonlu kare piramit geometrisine sahip bir molekül elde edilmiştir.



Şekil 4. Bakır organodifosfonat polimerine ait moleküler yapı

Tablo 1. Kristal verileri ve yapı iyileştirme parametreleri

Ampirik formül	C ₄ H ₆ CuO ₄ P
Mol kütlesi (g/mol)	212.61
Sıcaklık (K)	296(2)
Dalga boyu (Å)	0.71073
Kristal sistemi	Monoklinik
Uzay grubu	P2 ₁ /c
Kristal boyutları (mm)	0.06 x 0.05 x 0.03
a (Å)	10.8142 (9)
b (Å)	7.5839 (6)
c (Å)	7.3991 (6)
α (°)	90
β (°)	92.488 (3)
γ (°)	90
V (Å ³)	606.26 (9)
Z	4
D _c (g cm ⁻³)	2.329
F ₀₀₀	424.0
F ₀₀₀ '	425.87
μ (mm ⁻¹)	3.807
R _{int}	0.043
S	1.184
N _{ref}	1502
RI/wR2	0.0359/0.0947
T _{min} , T _{max}	0.482, 0.746
Δρ _{max} , Δρ _{min} (e Å ⁻³)	0.74, -0.61

Katmanlı yapıdaki organik ve inorganik kısımlar simetrik olarak dizilmiş ve polimerik yapıyı meydana getirmiştir. Fenil yapısında bulunan simetrik fosfonat gruplarından bağlanan bakır atomları ise inorganik zincirin oluşmasına neden olmuştur. Bakır atomları birbirlerine oksijen köprüleri ile bağlanarak yapı içinde sonsuz sayıda metalik köprülerin oluşmasına olanak sağlamıştır (Şekil 5). Yapıda bulunan atomlara ait bağ açıları (°) ve bağ uzunlukları (Å) Tablo 2'de verilmiştir. Fosfonat gruplarındaki hidroksil

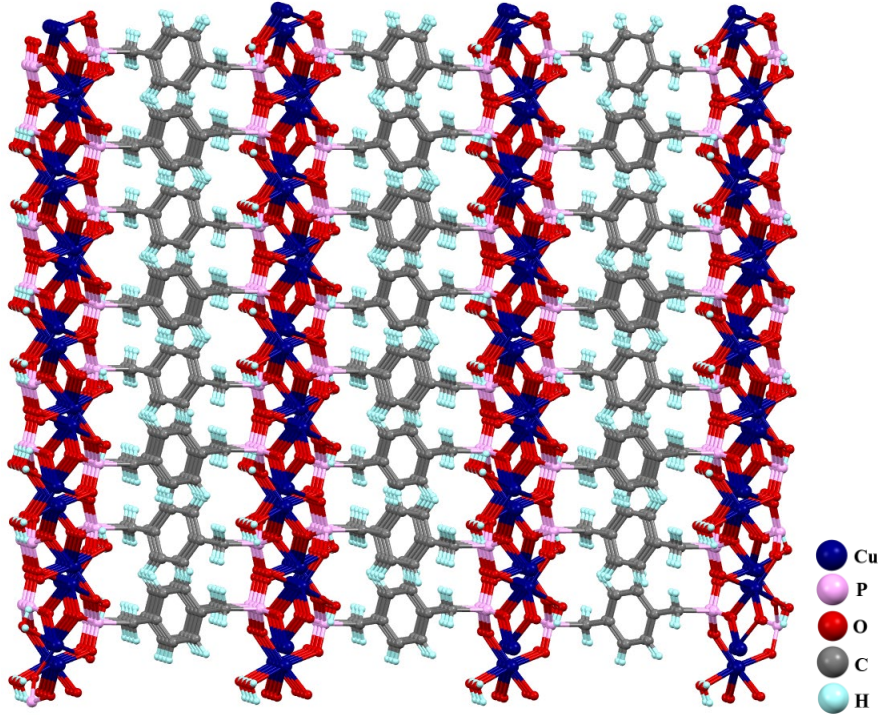
atomlarına bağlı Cu-O bağ uzunlukları 1.91-1.98 Å değerleri arasında iken koordine olmuş su atomuna ait Cu-O bağ uzunluğunun 2.02 Å olduğu görülmüştür. Tabloda bakıra koordine olmuş oksijen atomları arasındaki bağ açıları incelendiğinde 90°'nin altında ve üzerinde olduğu görülmektedir. Bu nedenle kısmen bozulmuş kare piramit geometrisi oluşmuştur.

Tablo 2. Polimere ait seçilen bağ uzunlukları (Å) ve bağ açıları (°)

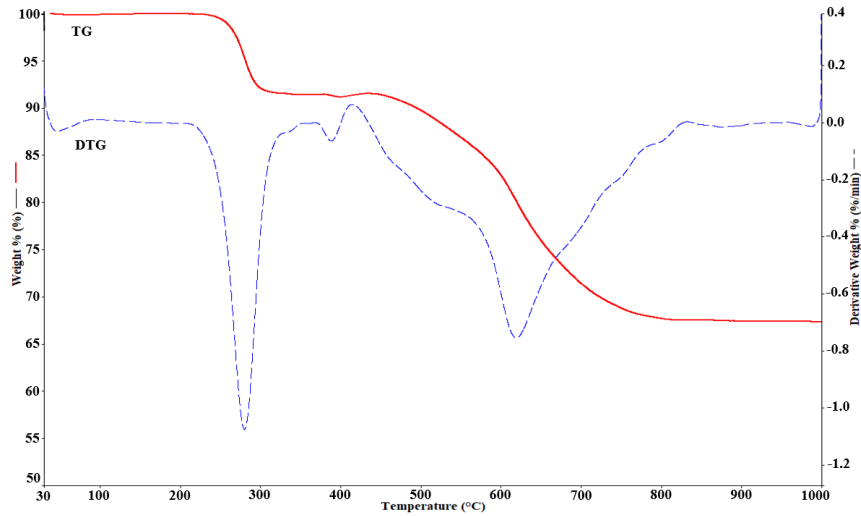
Bağ uzunluğu (Å)	
Cu1-O1	1.918 (2)
Cu1-O2 ⁱⁱ	1.953 (2)
Cu1-O3 ⁱⁱⁱ	1.983 (2)
Cu1-O4	2.018 (3)
Cu1-O2 ^{iv}	2.370 (2)
O2-Cu1 ^v	1.953 (2)
O1-P1	1.535 (2)
O2-P1	1.537 (2)
P1-O3	1.531 (2)
O3-Cu1 ⁱⁱⁱ	1.983 (2)
O4-H4A	0.825 (19)
O4-H4B	0.830 (18)
Bağ açısı (°)	
C2-C1-P1	116.8 (2)
C2-C1-H1A	108.1
P1-C1-H1A	108.1
O3 ⁱⁱⁱ -Cu1-O2 ^{iv}	87.66 (9)
P1-O1-Cu1	121.96 (13)
P1-O2-Cu1 ^{vi}	143.64 (14)
O3 ⁱⁱⁱ -Cu1-O4	170.30 (10)
O1-Cu1-O2 ^{iv}	107.67 (9)
O2 ⁱⁱ -Cu1-O2 ^{iv}	88.34 (9)
O4-Cu1-O2 ^{iv}	83.06 (9)
P1-O2-Cu1 ^v	122.78 (14)
Cu1 ^v -O2-Cu1 ^{vi}	91.66 (9)

Simetri kodları: (ii) -x+2, y-1/2, -z+1/2; (iii) -x+2, -y+1, -z+1; (iv) x, -y+1/2, z+1/2; (v) -x+2, y+1/2, -z+1/2; (vi) x, -y+1/2, z-1/2

1'e ait infrared spektrumunda (EK 5) 3000-3100 cm⁻¹ arasında gözlenen gerilme titreşimi ν(PO-H) grubundaki hidroksile aittir. Fosfonat gruplarına bağlı olan alifatik ν(C-H) titreşimi 2913 cm⁻¹ değerinde görülmektedir. 980-1200 cm⁻¹ arasındaki ikisi şiddetli diğeri orta şiddetli olan üç adet gerilme titreşimi difosfonat ligandlarında bulunan ν(P-O) bandlarına ait karakteristik piklerdir [31, 32]. Örneğin termal kararlılığının belirlenmesi için TG analizi yapılmıştır (Şekil 6). Örneğe ait TG/DTG eğrisi incelendiğinde 200 °C sıcaklığına kadar termal olarak kararlı olduğu görülmektedir. 200-310 °C arasındaki gözlenen kütle kaybı yapıda bulunan koordine su moleküllerine aittir. 370-700 °C sıcaklıkları arasında yapıda bulunan alifatik ve aromatik grupların termal olarak bozunmasına karşılık gelmektedir. 800 °C sonra herhangi bir kütle kaybı olmamış ve geriye CuO kaldığı gözlenmiştir.



Şekil 5. Katmanlı yapıya sahip 1 polimerinin ağ yapısı



Şekil 6. Katalizöre ait TG/DTG eğrisi

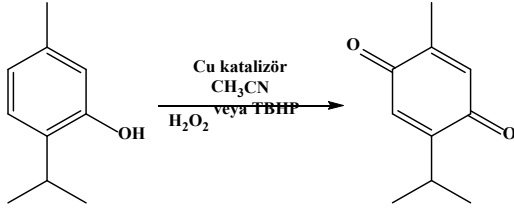
3.2 Katalizör Çalışmaları

Sentezlenen 1 polimerinin farklı organik ve inorganik çözücülerde çözünmemesi nedeniyle heterojen katalizör özelliği araştırılmıştır. Substrat timol ve hedef ürün timokinonun tanımlama ve dönüşüm oranı belirleme çalışmaları GC/MS kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Belirlenen koşullar altında elde edilen sonuçlar **Tablo 3**'de verilmiştir. Katalizörsüz ortamda timolün timokinona dönüşümünün eser miktarlarda olduğu bilinmektedir. Sentezlenen heterojen katalizörün timol oksidasyonu üzerindeki oksidant tipi, sıcaklık ve katalizör miktarının etkisi araştırılmıştır. Oksidant olarak H₂O₂ kullanıldığında oda sıcaklığında eser miktarlarda dönüşümler olduğu

gözlenmiştir. Sıcaklık 60 °C olduğunda ise elde edilen maksimum timol dönüşümünün %6.31 olduğu görülmüştür. Katalizör 1 bu oksidant türü ile hem oda sıcaklığında hem de 60 °C sıcaklığında dikkate değer bir dönüşüm sergilememiştir. TBHP kullanıldığında oda sıcaklığında 24 saat sonunda timol dönüşüm oranının %18.22 olduğu gözlenmiştir. Sıcaklık ve tepkime süresi artışı ile birlikte bu oranda artmalar meydana gelmiş ve 60 °C sıcaklıkta 12 saat sonunda dönüşüm oranı %92.37 olarak hesaplanmıştır. 60 °C sıcaklık ve 24 saat sonunda yapılan GC/MS analizi sonucunda ortamda yan ürünler oluştuğu gözlenmiştir. Katalizörün seçiciliği azalarak timol dönüşüm oranı %73.23 değerine düşmüştür. Sonuç olarak katalizör 1

kullanılarak TBHP varlığında, 12 saat ve 60 °C sıcaklıkta en yüksek dönüşüm oranı elde edilmiştir.

Tablo 3. Belirlenen optimum şartlarda 1 katalizörü kullanılarak elde edilen timol dönüşüm oranları



Deney No	Sıcaklık (°C)	Oksidant Türü	Süre (Saat)	Timol Dönüşüm Oranı
1	25	H ₂ O ₂	8	-
2	25	H ₂ O ₂	12	-
3	25	H ₂ O ₂	24	0.76
4	60	H ₂ O ₂	8	2.74
5	60	H ₂ O ₂	12	3.96
6	60	H ₂ O ₂	24	6.31
7	25	TBHP	8	-
8	25	TBHP	12	16.40
9	25	TBHP	24	18.22
10	60	TBHP	4	43.50
11	60	TBHP	8	80.15
12	60	TBHP	12	92.37
13	60	TBHP	24	73.23

Substrat/Katalizör = 200

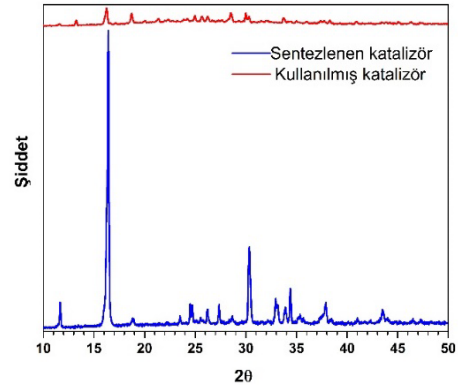
Sıcaklık, oksidant türü, tepkime süresinin yanı sıra katalizör miktarının timol dönüşümündeki etkisi de araştırılmıştır. Belirlenen koşullarda elde edilen timol dönüşüm oranları **Tablo 4**'de verilmiştir. Oda sıcaklığında yapılan çalışmalarda katalizör miktarının artması ile timol dönüşüm oranlarında artış gözlenmiştir. 8 mg katalizör ile %20.25 timol dönüşümü elde edilmiştir. 60 °C sıcaklığında katalizör miktarı 2-6 mg kullanıldığında timol dönüşüm oranında katalizör miktarına bağlı olarak artış meydana gelmiştir. 6 mg katalizör ile 12 saat sonunda %92.37 timol dönüşüm oranına ulaşılmıştır. Ancak katalizör miktarı 8 mg olduğunda yan ürünler oluşmaya başlamış ve toplam dönüşüm oranı %83.40'a düşmüştür. Özellikle sıcaklık artışı ile oksidant olarak TBHP kullanıldığında tepkime süresi ve katalizör miktarına bağlı olarak maksimum timol dönüşümleri elde edilmiştir.

Heterojen katalizörlerde tekrar kullanılabilirlik önemli bir parametredir. Bu nedenle sentezlenen katalizörün çalışılan koşullarda kaç defa kullanılabileceğini belirlemek için maksimum dönüşümün gözlemlendiği şartlarda katalizörün etkinliği incelenmiştir. Tepkime 60 °C'de TBHP kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir denemeden sonra **1** katalizörü santrifüj ile ayrılmış

daha sonra etil alkol ve asetonla yıkanarak aynı şartlarda tekrar kullanılmıştır. İlk iki deneme sırasında etkinliğini koruyan **1** katalizörü üçüncü denemede büyük oranda etkinliğini kaybetmiş ve dönüşüm oranının azaldığı gözlenmiştir. Katalizörün kullanılmadan önce ve üç kullanım sonrasındaki toz XRD desenleri incelendiğinde, son durumda aktif yüzeylerinin zarar görerek etkinliğini kaybettiği gözlenmiştir (**Şekil 7**). Bu durumun sıcaklık, oksidant türü veya katalizörün kullanım şeklinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Sonuç olarak sentezlenen katalizör, belirlenen optimum koşullar altında iki kez kullanılabilir.

Tablo 4. TBHP kullanarak timol oksidasyonunda katalizör miktarının etkisi

Deney No	Katalizör Miktarı (mg)	Sıcaklık (°C)	Süre (Saat)	Timol Dönüşüm Oranı
1	2	25	12	-
2	4	25	8	-
3	6	25	12	16.40
4	8	25	12	20.25
5	2	60	8	18.55
6	4	60	8	70.25
7	6	60	12	92.37
8	8	60	12	83.40



Şekil 7. Katalizör **1**'in kullanım öncesi ve üç kullanım sonrası toz XRD kırınımı desenleri

3.3 Literatür Çalışmalarının Karşılaştırılması

Timolün timokinona oksidasyonunda literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Farklı katalizör türleri kullanılarak yapılan çalışmaların özeti **Tablo 5**'de görülmektedir. Yüksek dönüşüme ve etkinliğe sahip katalizörlerin üretimi ile ilgili yeni çalışmalar yayınlanmaya devam etmektedir. Literatürde geçiş metali ve lantanit metali içeren komplekslerin homojen, heterojen ve biyokatalizör olarak kullanıldığı çalışmalar rapor edilmiştir.

Tablo 5. Timolün timokinona oksidasyonunda literatürde bulunan çalışmaların kıyaslanması

Katalizör	Oksidant Türü	Katalizör Miktarı (mg)	Sıcaklık (°C)	Seçicilik (%)	Timol Dönüşüm Oranı	Kaynak
Sitokrom P450	KHSO ₅	200	25	-	60.0	[33]
Biyomimetik kataliz	KHSO ₅	4.50	25	-	32.0	[33]
[Mn(III)PEG-porphyrin]	TBHP	3.19	30	-	94.0	[34]
[Mn(TF ₅ PP)Cl]	H ₂ O ₂	5.50	25	69.9	22.6	[35]
[Mn(β-NO ₂ TF ₅ PP)Cl]	H ₂ O ₂	5.74	25	85.1	27.3	[35]
[MnTBzPyP]	H ₂ O ₂	0.01	25	100	<18.0	[36]
[Mn ^{III} (H ₂ O)BW ₁₁ O ₃₉] ⁶⁻	H ₂ O ₂	16.25	82	-	35-40	[37]
[FePcTS]	KHSO ₅	0.10	25	18-31	99.0	[38]
[FePor]	KHSO ₅	3.34	25	-	47.6	[39]
{[Ni ₂ (NA)4(μ-H ₂ O)].2H ₂ O} _n	H ₂ O ₂	300	60	100	31.1	[40]
[Cr(H ₂ O)(OH)(C ₇ H ₃ NO ₄) ₂]	H ₂ O ₂	200	60	100	20.2	[41]
[Cu ₃ (C ₈ H ₉ O ₆ P ₂) ₂] _n	TBHP	10	60	100	38.0	[42]
[Nd(pyc)(pydc)(H ₂ O)] _n	H ₂ O ₂	150	60	100	40.4	[43]
[Dy(pyc)(pydc)(H ₂ O)] _n	H ₂ O ₂	150	60	100	36.4	[43]
(H ₂ pip) _n [Sm ₂ (pydc) ₄ (H ₂ O) ₂] _n	H ₂ O ₂	150	60	100	35.2	[44]
{[La ₂ (Hpdc) ₃ (H ₂ O) ₄].2H ₂ O} _n	H ₂ O ₂	0.30	60	100	24.0	[45]
[Fe(III)PPIX-1]	TBHP	5.0	25	-	22.0	[46]
[Cu ₂ (μ-adp)(dpya)].2ClO ₄ .2H ₂ O	TBHP	5.0	70	100	100.0	[47]
[Cu ₂ (C ₈ H ₉ O ₆ P ₂)(H ₂ O) ₂] _n	TBHP	6.0	60	100	92.4	S.Ç.

S.Ç.: Sunulan çalışma

Demirci ve ark., biyokatalizörler yardımıyla timokinon eldesi üzerine yaptıkları çalışmada, klorin a mangan ve porfirin mangan klorür türevleri kullanılarak biyomimetik katalizle yaklaşık %32.0, sitokrom P450 kullanılarak enzimatik kataliz ile ise yaklaşık %60.0 verimle timokinon elde ettiklerini rapor etmişlerdir [33]. Bir başka çalışmada suda çözünür Mn(III)PEG-porfirin kompleksinin timol oksidasyonu üzerindeki katalitik aktivitesi araştırılmış ve TBHP kullanılarak 30 °C'de %94.0 timol dönüşümü olduğu rapor edilmiştir [34]. Martin ve ark., tarafından yapılan çalışmada homojen [Mn(TF₅PP)Cl] ve [Mn(β-NO₂TF₅PP)Cl] katalizörleri sentezlenmiştir. Oda sıcaklığında oksidant olarak H₂O₂ kullanılarak yapılan çalışmada katalizörlerin sırasıyla %69.9 ve %85.1 seçicilik ile %22.6 ve %27.3 oranlarında timol dönüşümü gözlenmiştir [35]. Zeolit destekli bir tetrakatyonik Mn(III) porfirin kompleksi [MnTBzPyP] tarafından katalize edilen oksidasyon reaksiyonunda, asetonitrilde %100 seçicilikle 24 saatlik reaksiyondan sonra <%18.0 timol dönüşümü olduğu rapor edilmiştir [36]. Santos ve ark., tarafından yapılan çalışmada heterojen [Mn^{III}(H₂O)BW₁₁O₃₉]⁶⁻ katalizörü sentezlenmiştir. Asetonitrilin kaynama sıcaklığında H₂O₂ kullanıldığında, düşük seçicilikte ve %35-40 arasında timol dönüşümü gözlenmiştir. Ancak hedef ürün dışında benzokinin karışımı olduğu rapor edilmiştir [37]. Çimen ve ark., tarafından yapılan çalışmada timolün timokinona oksidasyonunda metanollü ortamda oksidant olarak KHSO₅ kullanılmıştır. Demir ftalosiyanın tetrasülfonat katalizörünü ([FePcTS]) kullanarak, oda sıcaklığında ve bir saatte %18-31 seçicilikte %99.0 oranında timol dönüşümü olduğu rapor edilmiştir [38]. Milos tarafından yapılan çalışmada mezo-tetrafenilporfirin ve ftalosiyanın Fe(III) kompleksleri sentezlenmiştir.

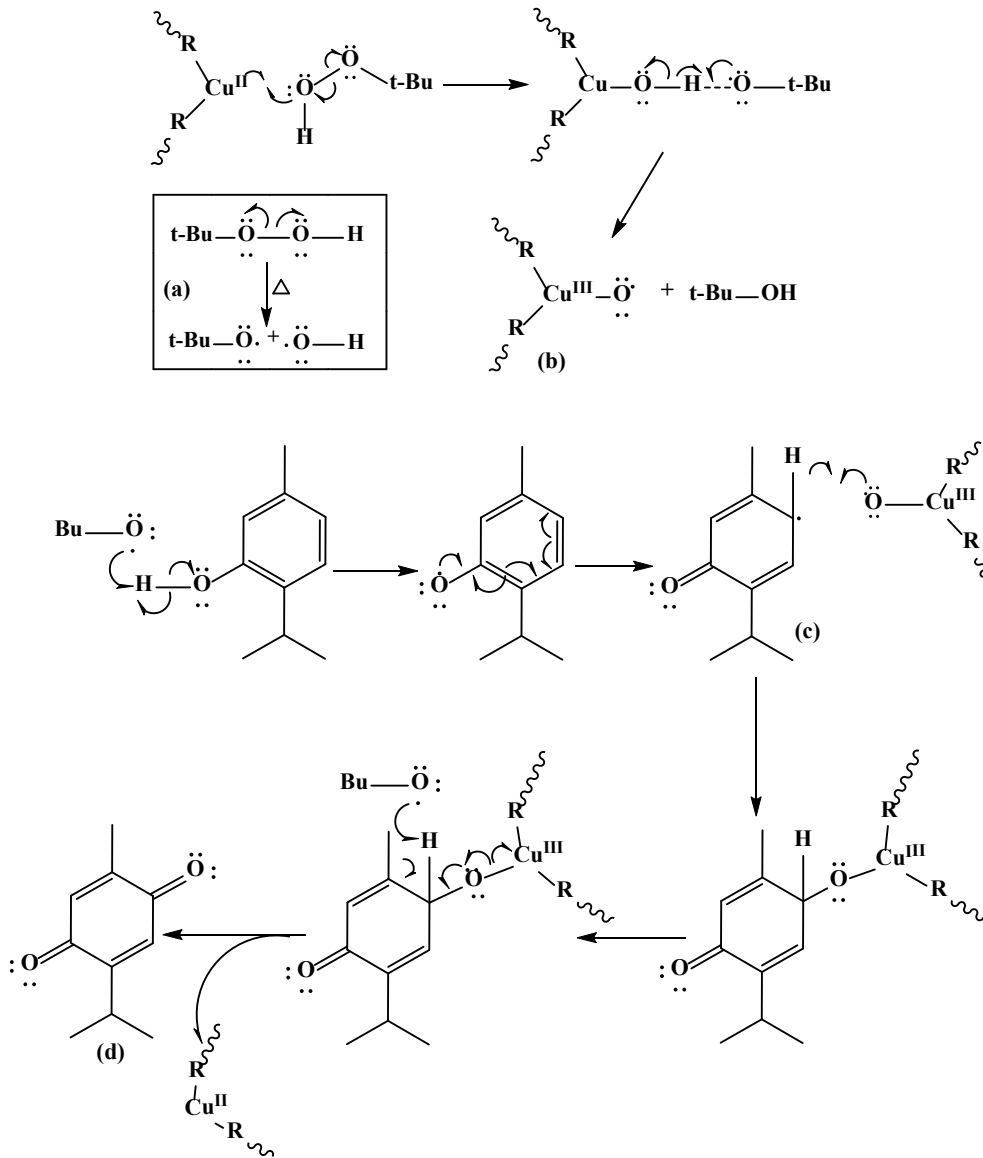
Asetonitril içinde KHSO₅ kullanılarak %47.6 timol dönüşümü olduğu rapor edilmiştir [39]. Ay ve ark., tarafından yapılan çalışmalarda subkritik hidrotermal koşulları altında birçok organik ve inorganik çözücüde çözünmeyen metal-organik koordinasyon polimerleri, {[Ni₂(C₆H₄NO₂)(μ-H₂O)].2H₂O}_n [40], [Cr(C₇H₃NO₄)(H₂O)(OH)] [41] ve [Cu₃(C₈H₉O₆P₂)₂]_n, [42] sentezlenmiştir. Heterojen katalizörlerin 60 °C sıcaklıkta H₂O₂ veya TBHP kullanılarak yüksek seçicilikte (%100) ve sırasıyla %31.1, %20.2 ve %38.0 oranlarında dönüşümler gösterdiği rapor edilmiştir. Düşük dönüşümlere rağmen katalizörlerin birden fazla kullanılabileceği rapor edilmiştir. Aynı grup tarafından katalizör olarak lantanit metali içeren koordinasyon polimerleri sentezlenmiştir. Oksidant olarak H₂O₂ kullanılarak 60 °C sıcaklıkta herhangi bir yan ürün oluşmadığı gözlenmiştir. Üretilen heterojen katalizörlerden [Nd(pyc)(pydc)(H₂O)]_n %40.4, [Dy(pyc)(pydc)(H₂O)]_n katalizörü %36.4 [43], (H₂pip)_n[Sm₂(pydc)₄(H₂O)₂]_n %35.2 [44] ve {[La₂(Hpdc)₃(H₂O)₄].2H₂O}_n %24.0 [45] timol dönüşümü göstermiştir. Egan ve ark., [Fe(III)PPIX] katalizörünü kullanarak sulu ortamda H₂O₂ kullandıklarında, hedef ürünün yanında yan ürün oluşumları gözlemlenmiştir. Çözücü olarak asetonitril ve oksidant olarak TBHP kullanıldığında oda sıcaklığında %22.0 timol dönüşümü olduğu rapor edilmiştir [46]. Kani tarafından yapılan çalışmada bakır metali içeren ve suda çözünebilir [Cu₂(μ-adp)(dpya)].2ClO₄.2H₂O kapalı formülüne sahip kompleks sentezlenmiştir. %100 seçicilik gösteren katalizör, 70 °C sıcaklıkta ve 15 dakikada %100 timol dönüşümü sergilemiştir. Su/hekzan bifazik sisteminde, Cu(II) ile adipik asit ve dipiridil amin varlığıyla katalize edilen timol oksidasyon reaksiyonunun ilk raporudur [47]. Literatür incelendiğinde özellikle

geçiş metali içeren katalizörlerin timol oksidasyonunda daha etkili olduğu görülmektedir. Bu metaller arasında Mn, Fe ve Cu metalleri ile en yüksek dönüşümler elde edilmiştir. Bu çalışma sonucunda da Cu içeren heterojen bir katalizör yüksek dönüşüm ve seçicilik göstermiştir.

3.4 Oksidasyon Tepkimesi İçin Önerilen Mekanizma

Cu^{2+} 'nin Lewis asitliği, fosfonat ve benzen halkasının bazlığı ve bu kataliz davranışı için bakır iyonlarının redoks özelliklerinin rolünü araştırmak için bir mekanizma önerilmiştir. Elde edilen katalitik sonuçlara ve literatürde bulunan önceki çalışmalara dayanarak, timolden timokinon oluşumunun **Şekil**

8'deki mekanizma üzerinden gerçekleştiği düşünülmektedir. Öncelikle katalitik koşullar altında TBHP parçalanarak bir radikal oluşur (**a**). Oluşan radikal timole atak yaparak bir fenolik radikal oluşturur. TBHP ile etkileşen katalizör Cu-O radikalini oluşturur ve bakır +2'den +3'e yükseltgenir ($\text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Cu}^{3+}$) (**b**). Bir Lewis asidi olan bakıra bağlı benzen ve fosfonat grupları, elektron yoğunluğu ve rezonans yapıdan dolayı Cu-O radikalinin kararlı halde kalmasını sağlar. Cu-O radikali oksijen köprüsü yaparak fenolik radikale bağlanır (**c**). Son kısımda bakırın ayrılması ile yükseltgenme tamamlanarak nihai ürün timokinon oluşumu gerçekleşir (**d**). Ayrılan katalizör heterojen özelliğe sahip olduğu için yeniden kullanılabilir.



Şekil 8. Katalizör 1 ve TBHP (t-Bu-O-OH) ile timol oksidasyonu için önerilen mekanizma

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, (1,4-fenilenbis(metilen))bis(fosfonik asit) ligandı (H₄L) ve katmanlı yapıya sahip bakır organodifosfonat polimeri, [Cu₂(C₈H₈O₆P₂)(H₂O)₂]_n (**1**), sentezlenerek yapıları aydınlatılmıştır. Subkritik koşullar altında sentezlenen katalizör bir çok organik ve inorganik çözücünde çözünmediği için heterojen katalitik aktivitesi araştırılmıştır. Katalizörün termal kararlılığı incelendiğinde 200 °C sıcaklığa kadar kararlı olduğu görülmüştür. Bu sıcaklıktan sonra kütle kayıpları meydana gelmeye başlamıştır. Timol oksidasyonu üzerine yapılan heterojen katalizör çalışmaları sonucunda TBHP kullanılarak 60 °C sıcaklıkta %100 seçicilik göstererek %92.4 timol dönüşümü gerçekleşmiştir. Literatür incelendiğinde özellikle demir, mangan ve bakır içeren katalizörlerin timol oksidasyonunda en etkili katalizörler olduğu görülmektedir. Bu çalışma sonucunda da bakır içeren katalizörün timol oksidasyonunda yüksek seçicilik ve dönüşüme sahip etkili katalizörlerden biri olduğu sonucuna varılmıştır. Ülkemizde üretimi olmayan timokinon bileşiğinin kullanılacak etkili katalizörler yardımıyla ekonomik olarak üretilebilmesi katma değer sağlayacaktır. Sağlık alanında etkinliği yapılan çalışmalarla ispatlanan timokinon bileşiğinin gıda, kozmetik ve ambalaj sektörlerinde katkı malzemesi olarak kullanımının yaygınlaşması da önemlidir. Çünkü hastalıklara yakalanmadan önce bağışıklık sisteminin güçlü tutulması daha etkin bir tedavi şekli olarak kabul edilmektedir. Bu düşünceyle timokinon bileşiğinin hastalığı iyileştirmesinin yanı sıra bu sektörlerde kullanılarak hastalık önleyici olarak da kullanılabilirliği düşüncesi gelecekteki araştırmalara katkılar sağlayabilecektir.

TEŞEKKÜR

Tek kristal X-ışını yapı çözümlemesinde verdiği destekten dolayı Prof. Dr. Onur ŞAHİN'e ve Bruker D8 QUEST difraktometrenin kullanımı için Sinop Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne teşekkür ederim. Katalizör mekanizmasının önerilmesinde önemli katkılar sağlayan Öğr. Gör. Serkan KARACA'ya (Çukurova Üniversitesi) teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- [1] Jones, S., Liu, H., Schmidtke, K., O'Connor, C.C. ve Zubieta, J. (2010). A bimetallic oxide framework, [Cu(bpy)]₂Mo₄O₁₀(O₃PCH₂C₆H₄CH₂PO₃)₂, constructed from novel {Mo₄O₁₀(O₃PR)₄}_n⁴ⁿ⁻ chains. *Inorg. Chem. Commun.*, 13, 298-301.
- [2] DeBurgomaster, P., Liu, H., O'Connor, C.J. ve Zubieta, J. (2010). Hydrothermal synthesis and structural characterization of bimetallic organic-inorganic hybrid materials: Copper vanadate-1,4-Carboxy-phenylphosphonate phases. *Inorg. Chim. Acta*, 363, 330-337.
- [3] Mitzi, D.B. (2001). Templating and structural engineering in organic-inorganic perovskites. *Dalton Trans.*, 1, 1-12.
- [4] Furukawa, H. ve Yaghi, O.M. (2009). Storage of Hydrogen, Methane, and Carbon Dioxide in Highly Porous Covalent Organic Frameworks for Clean Energy Applications. *J. Am. Chem. Soc.*, 131, 8875-8883.
- [5] Yaghi, O.M. (2007). Metal-organic frameworks: a tale of two entanglements. *Nat Mater.*, 6(2), 92-3.
- [6] Rowsell, J.L. ve Yaghi, O.M. (2005). Strategies for hydrogen storage in metal-organic frameworks. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 44(30), 4670-9.
- [7] Yaghi, O.M., O'Keeffe, M., Ockwig, N.W., Chae, H.K., Eddaoudi, M. ve Kim, J. (2003). Reticular synthesis and the design of new materials. *Nature*, 423(6941), 705-14.
- [8] Ferey, G. (2009). Some suggested perspectives for multifunctional hybrid porous solids. *Dalton Trans.*, 23, 4400-4415.
- [9] Ferey, G. (2008). Hybrid porous solids: past, present, future. *Chem. Soc. Rev.*, 37, 191-214.
- [10] Fukushima, T., Horike, S., Kobayashi, H., Tsujimoto, M., Isoda, S., Foo, M.L., Kubota, Y., Takata, M. ve Kitagawa, S. (2012). Modular Design of Domain Assembly in Porous Coordination Polymer Crystals via Reactivity-Directed Crystallization Process. *J. Am. Chem. Soc.*, 32, 13341-13347.
- [11] Kitagawa, S. ve Matsuda, R. (2007). Chemistry of coordination space of porous coordination polymers. *Coord. Chem. Rev.*, 251, 2490-2509.
- [12] DeBurgomaster, P., Liu, H., O'Connor, C.J. ve Zubieta, J. (2010). Metal-organophosphonates: hydrothermal synthesis and structures of [Cu(O₃PC₁₀H₆CO₂H)] and [Cu(bpy)(HO₃PC₁₀H₆CO₂)] (H₂O₃PC₁₀H₆CO₂H = 2,6-carboxynaphthalene phosphonic acid). *Inorg. Chim. Acta*, 363, 1654-1658.
- [13] Greenfield, T.J., Takemoto, T., Cano, J., Lloret, F., Julve, M., Zubieta, J. ve Doyle, R.P. (2019). A methylenediphosphonate bridged copper(II) tetramer: Synthesis, structural, thermal, and magnetic characterization of [Cu₄(H₂O)₂(phen)₄(μ-P₂O₆CH₂)₂].21H₂O. *Polyhedron*, 169, 162-168.
- [14] Clearfield, A. (2012). Metal Phosphonate Chemistry from Synthesis to Applications, Demadis, K. (ed.), 1. baskı, *Royal Society of Chemistry*, London, United Kingdom, s. 675.
- [15] Lopez, V., Minichelli, J., Case, D., Ruhlandt, K., Doyle, R.P. ve Zubieta, J. (2020). Hydrothermal synthesis and structure of a two-dimensional Fe(III)-organodiphosphonate compound, [Fe(O₃PCH₂C₆H₄CH₂PO₃H)(H₂O)], and an Expansion of the Harris Notation. *Inorg. Chim. Acta*, 506, 119518.

- [16] Güllü, E.B. ve Avcı, G. (2013). Timokinon: *Nigella Sativa*'nın Biyoaktif Komponenti, *Kocatepe Vet. J.*, 6(1), 51-61.
- [17] Yanaroğlu, S. (2011). Çörekotunun (*Nigella Sativa* L.) Biyolojik Etkileri Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Yakın Doğu Üniversitesi, Lefkoşa, s. 7-10.
- [18] Al-Gaby, A. M. (1998). Amino acid composition and biological effects of supplementing broad bean and corn proteins with *Nigella sativa* (black cumin) cake protein. *Nahrung*, 42, 290-4.
- [19] Mohamed Abdel-Fattah, A-F. M., Matsumoto, K. ve Watanabe, H. (2000). Antinociceptive effects of *Nigella sativa* oil and its major component, thymoquinone, in mice. *Eur. J. Pharmacol.*, 400, 89-97.
- [20] Jaswal, A., Sinha, N., Bhadauria, M., Shrivastava, S. ve Shukla, S. (2013). Therapeutic potential of thymoquinone against anti-tuberculosis drugs induced liver damage. *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, 36, 779-786.
- [21] Aljabre, S.H.M., Randhawa, M.A., Akhtar, N., Alakloby, O. M., Alqurashi, A.M. ve Aldossary, A. (2005). Antidermatophyte activity of ether extract of *Nigella sativa* and its active principle, thymoquinone. *J. Ethnopharmacol.*, 101, 116-119.
- [22] Jrah-Harzallah, H., Ben-Hadj-Khalifa, S., Almawi, W. Y., Maaloul, A., Houas, Z. ve Mahjoub, T. (2013). Effect of thymoquinone on 1,2-dimethyl-hydrazine-induced oxidative stress during initiation and promotion of colon carcinogenesis. *Eur. J. Cancer*, 49, 1127-1135.
- [23] Lei, X., Lv, X., Liu, M., Yang, Z., Ji, M., Guo, X. ve Dong, W. (2012). Thymoquinone inhibits growth and augments 5-fluorouracil-induced apoptosis in gastric cancer cells both in vitro and in vivo. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 417, 864-868.
- [24] Ravindran, J., Nair, H. B., Sung, B., Prasad, S., Tekmal, R. R. ve Aggarwal, B. B. (2010). Thymoquinone poly (lactide-co-glycolide) nanoparticles exhibit enhanced anti-proliferative, anti-inflammatory, and chemosensitization potential. *Biochem. Pharmacol.*, 79, 1640-1647.
- [25] Woo, C.C., Kumar, A.P., Sethi, G. ve Tan, K.H.B. (2012). Thymoquinone: Potential cure for inflammatory disorders and cancer. *Biochem. Pharmacol.*, 83, 443-451.
- [26] Sheldrick, G.M. (2008). A short history of SHELX. *Acta Cryst.*, A64, 112-122.
- [27] Sheldrick, G. M. (2015) Crystal structure refinement with SHELXL. *Acta Cryst.*, C71, 3-8.
- [28] APEX2, (2013). Bruker AXS Inc. Madison Wisconsin USA.
- [29] Arnold, D.I., Ouyang, X. ve Clearfield, A. (2002). Synthesis and Crystal Structures of Copper(II) Diphosphonatoalkanes: C4 and C5. *Chem. Mater.*, 5, 2020-2027.
- [30] Thorat, P.B., Goswami, S.V., Magar, R.L., Patil, B.R. ve Bhusare, S.R. (2013). An Efficient Organocatalysis: A One-Pot Highly Enantioselective Synthesis of α -Aminophosphonates. *Eur. J. Org. Chem.*, 45(3), 5509-5516.
- [31] Gomez-Alcantra, M.M., Cabeza, A., Martinez-Lara, M., Aranda, M.A.G., Suau, R., Bhuvanesh, N. ve Clearfield, A. (2004). Synthesis and Characterization of a New Bisphosphonic Acid and Several Metal Hybrids Derivatives. *Inorg. Chem.*, 43, 5283-5293.
- [32] Ortiz-Avila, C.Y., Bhardwaj, C. ve Clearfield, A. (1994). Zirconium Polyimine Phosphonates, a New Class of Remarkable Complexing Agents. *Inorg. Chem.*, 33, 2499-2500.
- [33] Demirci, F., Berber, H. ve İşcan, G. (2008). Biyokatalizörler yardımıyla p-simen'den timokinon ve benzeri biyoaktif metabolitlerin üretimi (TÜBİTAK, Proje No: 106T117).
- [34] Neves, M.B.C., Tome, J.P.C., Hou, Z., Dehaen, W., Hoogenboom, R., Neves, M.G.P.M.S. ve Simoes, M.M.Q. (2018). Oxidation of Monoterpenes Catalysed by a Water-Soluble Mn(III) PEG-Porphyrin in a Biphasic Medium. *ChemCatChem.*, 10(13), 2804-2809.
- [35] Martins, R.L., Neves, M.G.P.M.S., Silvestre, A.J.D. ve Silva, A.M.S. (1999). Oxidation of aromatic monoterpenes with hydrogen peroxide catalysed by Mn(III)porphyrin complexes. *J. Mol. Catal. A Chem.*, 137, 41-47.
- [36] Skrobot, F.C., Valente, A.A., Neves, G., Rosa, I., Rocha, J. ve Cavaleiro, J.A.S. (2003). Monoterpenes oxidation in the presence of Y zeolite-entrapped manganese(III) tetra(4-N-benzylpyridyl)porphyrin. *J. Mol. Catal. A Chem.*, 201, 211-222.
- [37] Santos, I.C.M.S., Simoes, M.M.Q., Pereira, M.M.M.S., Martins, R.R.L., Neves, M.G.P.M. S., Cavaleiro, J.A.S. ve Cavaleiro, A.M.V. (2003). Oxidation of monoterpenes with hydrogen peroxide catalysed by Keggin-type tungstoborates. *J. Mol. Catal. A Chem.*, 195, 253-262.

- [38] Günay, T., Çimen, Y., Karabacak, R.B. ve Türk, H. (2016). Oxidation of Thymol and Carvacrol to Thymoquinone with KHSO_5 Catalyzed by Iron Phthalocyanine Tetrasulfonate in a Methanol-Water Mixture. *Catal. Letters*, 146, 2306-2312.
- [39] Milos, M. (2001). A comparative study of biomimetic oxidation of oregano essential oil by H_2O_2 or KHSO_5 catalyzed by Fe (III) meso-tetraphenylporphyrin or Fe (III) phthalocyanine. *Appl. Catal. A Gen.*, 2016(1), 157-161.
- [40] Ay, B., Yag, G., Yildiz, E. ve Rheingold, A.L. (2015). Hydrothermal synthesis and characterization of $\{[\text{Ni}_2(\text{NA})_4(\mu\text{-H}_2\text{O})].2\text{H}_2\text{O}\}_n$ (HNA = nicotinic acid) and its heterogeneous catalytic Effect. *Polyhedron*, 88, 164-169.
- [41] Ay, B., Yildiz, E., Jones, S. ve Zubieta, J. (2012). Hydrothermal synthesis of a novel μ -dihydroxobis(2,6-pyridinedicarboxylatoaqua-achromium(III)) complex and investigation of its catalytic activity. *Inorg. Chim. Acta*, 387, 15-19.
- [42] Ay, B., Takano, R., Ishida, T. ve Yildiz, E. (2022). Tricopper(II)bis(2-((hydrogen phosphonato)methyl)benzylphosphonate) as a layered oxo-bridged copper(II) coordination polymer: Synthesis, structure, magnetic property, and catalytic activity. *Polyhedron*, 225, 116038.
- [43] Ay, B., Yildiz, E. ve Kani, İ. (2017). Two novel isostructural and heteroleptic Nd(III) and Dy(III)-organic frameworks constructed by 2,5-pyridinedicarboxylic acid and in situ generated 2-pyridinecarboxylic acid: Hydrothermal synthesis, characterization, photoluminescence properties and heterogeneous catalytic activities. *Polyhedron*, 130, 165-175.
- [44] Ay, B., Yildiz, E., Felts, A.C. ve Abboud, K.A. (2016). Hydrothermal synthesis, structure, heterogeneous catalytic activity and photoluminescent properties of a novel homoleptic Sm(III)-organic framework. *J. Solid State Chem.*, 244, 61-68.
- [45] Ay, B., Yildiz, E., Protasiewicz, J.D. ve Rheingold, A.L. (2013). Hydrothermal synthesis, crystal structure and heterogeneous catalytic activity of a novel inorganic-organic hybrid complex, possessing infinite La-O-La linkages. *Inorg. Chim. Acta*, 399, 208-213.
- [46] Dare, N.A., Brammer, L., Bourne, S.A. ve Egan, T.J. (2018). Fe(III) Protoporphyrin IX Encapsulated in a Zinc Metal-Organic Framework Shows Dramatically Enhanced Peroxidatic Activity. *Inorg. Chem.*, 57, 1171-1183.
- [47] Kani, İ. (2023). Oxidation of thymol catalysed by a water-soluble Cu (II)-adipate-diphenylamine complex in a biphasic medium. *Polyhedron*, 230, 116237.

Poli-fenilen-Sülfid Polimer Kompozitine Karşı Poliamit-6 Polimeri ile Mika ve Cam Elyaf Takviyeli Poliamit-6 Polimer Kompozitlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları

Friction and Wear Behavior of Polyamide-6 Polymer and Mica and Glass Fiber Reinforced Polyamide-6 Polymer Composites against Poly-phenylene-Sulfide Polymer Composite

Hüseyin ÜNAL¹ , Salih Hakan YETGİN² , Mustafa GÜLEŞEN³ 

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malz. Müh. Böl., Sakarya, Türkiye

²Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus/Mersin, Türkiye

³Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, katkısız Poliamit (PA6) polimeri ile ağırlık olarak %20 oranında mika katkılı Poliamit 6 (PA6/20M) ve %20 oranında mika/%10 oranında cam elyaf (CE) katkılı Poliamit 6 (PA6/20M/10CE) kompozitlerin tribolojik özellikleri incelenmiştir. PA6/20M ve PA6/20M/10CE kompozit granül üretimi için önce çift vidalı endüstriyel tip bir ekstruder kullanılmıştır. Test numunelerinin üretimi için ise geleneksel bir enjeksiyon makinası kullanılmıştır. Aşınma ve sürtünme testleri kuru ortam şartları altında %40 kısa cam elyaf takviyeli Poli-fenilen-Sülfid (PPS/40CE) polimer kompozit diskinde karşı yapılmıştır. Aşınma deneyleri ASTM G99 standardına uygun olarak pim-disk aşınma test cihazı kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Triboloji deneylerinde üç farklı yük (10-20-30 N) ve 0.5 m/s sabit kayma hızı kullanılmıştır. Çalışma şartları altındaki malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma hacmi değişimi belirlenmiştir. Çalışma sonucunda uygulanan yükün artırılması ile katkısız PA6 polimeri ile PA6/20M ve PA6/20M/10CE kompozitlerin sürtünme katsayıları sırasıyla %25,2, %29,6 ve %15,2 oranlarında artış göstermiştir. PA6 polimerine ilave edilen %20 oranındaki mika katkısı sürtünme katsayısını %33,0 oranında artırmıştır. PA6/20M kompozitine ilave edilen %10 oranındaki cam elyaf ise sürtünme katsayısını %86,1 oranında azaltmıştır. Uygulanan yükün artırılması ile katkısız PA6 polimerinin aşınma hacmi %200 oranında artarken PA6/20M kompozitinde %291,3 oranında artmıştır. Buna ilaveten PA6/20M/10CE hibrit kompoziti aşınma hacmi ise %371,4 oranında artmıştır. Deneyler sonucunda en az aşınma hacmi diğer kombinasyonlarla kıyaslandığında minimum %20 oranında PA6/20M-10CE/PPS-40CE kombinasyonunda elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Poliamit, Poli-fenilen sülfid, Aşınma, Sürtünme, Cam elyaf, Mika

Abstract

In this study, the tribological properties of Polyamide 6 (PA6/20M) and Polyamide 6 (PA6/20M/10CE) composites with 20% by weight mica filled and 20% mica/10% glass fiber (CE) reinforced, respectively, were investigated. For the production of PA6/20M and PA6/20M/10CE composite granules, a twin screw industrial type extruder was first used. A conventional injection molding machine was used to produce the test specimens. Friction and wear tests were carried out against a 40% short glass fiber reinforced Poly-phenylene-Sulfide (PPS/40CE) polymer composite disk under dry conditions. Wear tests were carried out at room temperature using a pin-disc wear test rig in accordance with ASTM G99 standard. Three different loads (10-20-30 N) and a constant sliding speed of 0.5 m/s were used in the tribology experiments. The coefficient of friction and wear volume changes of the materials under the operating conditions were determined. As a result, with the increase in applied load, the friction coefficients of unfilled PA6 polymer and PA6/20M and PA6/20M/10CE composites increased by 25.2%, 29.6% and 15.2%, respectively. The addition of 20% mica to PA6 polymer increased the coefficient of friction by 33.0%. The addition of 10% glass fiber to PA6/20M composite decreased the coefficient of friction by 86.1%. By increasing the applied load, the wear volume of the unfilled PA6 polymer increased by 200% while that of the PA6/20M composite increased by 291.3%. In addition, the wear volume of PA6/20M/10CE hybrid composite increased by 371.4%. As a result, the lowest wear volume was obtained in the PA6/20M-10CE/PPS-40CE combination with a minimum of 20% compared to other combinations.

Keywords: Polyamide, poly-phenylene sulfide, Wear, Friction, Glass fiber, Mica

I. GİRİŞ

Poliamit 6 (PA6) ve PA6 esaslı kompozitlerin kullanımı, elektrik/elektronik, havacılık, otomotiv ve kimya gibi endüstrilerde son yıllarda giderek artmaktadır. Bunun sebebi; PA6 polimerinin geleneksel malzemeler ile karşılaştırıldığında yüksek dayanım/ağırlık oranına, kendinden yağlamalı özelliğe, iyi sönümleme davranışına, korozyon direncine, UV ve gama radyasyon direncine sahip olması ve ayrıca kolay ve ekonomik bir şekilde üretilebilmesidir. Fakat, katkısız PA6 polimerinin mekanik özellikler seviyesinde sınırlı kalması, düşük ısı sapma sıcaklığı, yüksek su emme ve ölçüsel kararsızlığı kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda düşük mekanik özelliklere sahip olması, daha düşük termal iletkenlik ve daha yüksek termal genleşme katsayısına sahip olmaları poliamit polimerini sıcaklık değişimlerine çok daha hassas hale getirmektedir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için birçok araştırmacı takviye edici katkı malzemeleri kullanarak PA6 polimerinin özelliklerini geliştirme çalışmaları yapmıştır. Polimer malzemelerin gerek mekanik, fiziksel veya termal özelliklerini geliştirmek gerekse tribolojik özelliklerini iyileştirmek için matris bünyesine takviye, dolgu ve katkı malzemeleri ilave edilebilmektedir [1-6]. Bu malzemelerin içerisinde cam elyaf (CE), diğer elyaf türlerine göre düşük maliyetli olması, üstün kimyasal dirence ve yüksek yalıtım özelliklerine sahip olmaması ve ayrıca kolay şekillendirme ve temin edilebilirlik gibi özellikleriyle en çok kullanılan ve tercih edilen elyaf türüdür [4-5, 7]. Nuruzzaman ve arkadaşları [8] farklı oranlarda (%5-20) CE takviyeli PA6 kompozitlerin mekanik özelliklerine CE takviye oranının etkisini incelemişlerdir. CE oranının artması ile kompozit malzemenin çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve çekmedeki elastiklik modülü değerlerinin arttığı ancak kopmadaki uzama değerinin azaldığı belirtilmiştir. Darbe enerjisi miktarının ise CE miktarına bağlı olarak değiştiği, %15 CE takviye oranından daha yüksek CE oranlarında darbe enerjisinin arttığı belirtilmiştir. Zaldua ve arkadaşları [9] karbon elyaf (KE) ve CE takviyeli PA6 kompozit numunelerde CE ve KE oranının çekme mukavemeti ve çekmedeki elastiklik modülü değerlerini önemli oranda geliştirdikleri belirtilmiştir. Mariusz ve arkadaşları [4] %25 ve %30 oranlarında CE takviyeli PA6 ve PA66 kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Moustafa Mahmoud ve arkadaşları [5] da hacimsel olarak %25, 33 ve 50 oranlarında CE takviyeli PA6 kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini inceledikleri çalışma sonucunda, fiber oranına bağlı olarak mekanik özelliklerin geliştiği ancak aşınma miktarının ise fiber oranı ile ters orantılı olduğu belirtilmiştir. %33 CE takviye oranının aşınma direnci için optimum katkı miktarı olduğu ve aşınma oranının, PA6/25CE ve PA6/50CE kompozitlere göre yaklaşık %50,2 ve %65,59 oranlarında daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Mika ise plaka benzeri kristal yapısı ile üstün mekanik ve termal özellikler, yüksek elektriksel yalıtım özellikleri ile polimer malzemelerden daha ucuz olması nedeniyle polimer kompozit malzeme üretiminde katkı malzemesi olarak en çok tercih edilen minerallerden birisidir [2, 10-14]. Suryasarathi ve arkadaşları [15] artan mika miktarı ile PA6 kompozitlerin çekme mukavemeti, eğme mukavemeti, çekme ve eğmedeki elastiklik modülü değerlerinin arttığını, % uzama ve darbe mukavemeti değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Çalışmada ayrıca mekanik özelliklerin gelişmesinde mika partikül boyutunun önemli olduğu da belirtilmiştir. Lubomir ve arkadaşları [11] vollastonit ve mika katkılı yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Mika/YYPE kompozitlerin çekmedeki elastiklik modülü ve akma dayanımı değerleri artarken kopmadaki % uzama ve kırılma tokluğu değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Termal özellikler açısından mika katkısının ergime sıcaklığını yaklaşık 3 oC azaltırken kristallenme oranını yaklaşık %30,2 oranında artırdığı belirtilmiştir. Ünal ve Mimaroglu [16] ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında mika katkılı ve CE takviyeli PA6 kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Polimer anan matrise mika ve CE ilavesi ile kompozitin çekme ve eğmedeki elastiklik modüllerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Mika ilavesi ile PA kompozitlerin mekanik özelliklerinde pek değişikliğin olmadığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, mika katkı oranının artması sonucunda darbe mukavemeti ve % uzama değerlerinin azaldığı belirtilmiştir. Gan ve arkadaşları [17] poli-aril-eterketon (PAEK) polimerine farklı oranlarda (ağırlıkça %0-40) ilave ettikleri mika katkısının mekanik ve tribolojik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Mika katkı oranına bağlı olarak çekme mukavemeti ve çekmedeki elastiklik modülü değerlerinin arttığı % uzama değerinin ise azaldığı belirtilmiştir. Triboloji çalışmaları sonucunda sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerinin yük ile birlikte arttığı gözlenmiştir. %20 mika oranından daha yüksek katkı oranlarında sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri artmıştır.

Polimer malzemelerin tribolojik özellikleri oldukça karmaşık görünmekle birlikte polimer malzeme özelliklerine, karşı yüzey malzeme özelliklerine, matris malzemesine ilave edilen katkı maddesi çeşidine ve oranına, aynı zamanda uygulanan yük, kayma hızı, kayma mesafesi ve ortam şartlarına gibi proses şartlarına da bağlıdır. Polimer malzeme ve kompozitlerin çalışma ömrünün artırılması için çalışma şartlarına uygun doğru kurgulanmış malzeme çiftinin seçilmesi oldukça önemlidir. Triboloji çalışmalarında sürtünme katsayısının azaltılması ve aşınmaya direncinin artırılması için en uygun polimer-polimer veya polimer-metal malzeme kombinasyonunun seçilmesi gerekir. Pogacnik ve arkadaşları [18] çelik disk ve PA6 diske karşı PA6 polimerinin farklı yük ve

hızlar altındaki tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışmalarında PA6 pim/PA6 disk temasında, temas noktasında oluşan ısının uzaklaştırılmaması nedeniyle daha kötü tribolojik özelliklerin elde edildiği ifade edilmiştir. PA6 pim/PA6 disk temasındaki başlangıç aşamasının (running-in period), PA6 pim/çelik disk temasına göre yaklaşık 30 kat daha uzun olduğu belirtilmiştir. PA6 pim/Çelik disk temasında, yüksek PV (pressure x velocity) değerlerinde sürtünme katsayısı, aşınma oranı ve aşınma mekanizmasında ihmal edilebilir seviyede değişiklikler gözlemlendiği belirtilmiştir. Ünal ve arkadaşları [19] kuru ortam şartları altında, 0,5 m/s kayma hızında, 0,7, 1,41 ve 2,12 MPa basınç altında pim-disk sistemi ile %30 CE takviyeli Poli-eter-eterketon (PEEK) kompozitlerin aşınma ve sürtünme özelliklerini incelemişler ve PEEK/30CE pim numunesinin, PEI/10%PTFE disk numunesi ile çalıştığı en iyi aşınma ve sürtünme özellikleri sergilediğini belirtmişlerdir. Ünal ve arkadaşları [2] yaptıkları bir başka çalışmada, PA6 polimerine ilave ettikleri mika katkısının (%0-30 oranlarındaki) aşınma ve sürtünme özelliklerini, kuru ortam şartları altında, %30 oranında mika katkılı PA6 polimer kompozit ve %30 oranında CE takviye edilmiş PA6 polimer kompozit disklere karşı incelemiştir. Çalışma sonucunda, her iki polimer kompozit disklere karşı yapılan deneylerde mika katkı oranının artması ile aşınma oranının ve sürtünme katsayısının arttığı belirtilmiştir. Uygulanan yükün artması sonucunda PA6/Mika kompozitlerin aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerlerinin de arttığı belirtilmiştir. Demir [20] PA6/%20Mika ve Poli-sülfon (PSU)/%20CE kompozitlerin, AISI 316L paslanmaz çelik disk ve %30 CE takviyeli poli-fenilen-sülfite (PPS/30CE) polimer diske karşı kuru ortam şartları altında tribolojik özelliklerini incelemiştir. Deneyler 10, 20 ve 30 N yük ve 0,5 m/s kayma hızında yapılmıştır. PA6/%20Mika ve PSU/%20CE kompozitlerin, paslanmaz çelik diske karşı çalışması durumunda aşınma oranının ve sürtünme katsayısının azaldığını, PPS/30CE diske karşı çalışması durumunda ise aşınma oranı değerlerinin arttığı sürtünme katsayısının pek değişmediği bildirilmiştir. Çalışma sonucunda, sürtünme katsayısının malzeme kombinasyonu ile oldukça önemli olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada, katkısız Poliamit (PA6) polimeri ile ağırlık olarak %20 oranında mika katkılı Poliamit 6 (PA6/20M) ve %20 oranında mika/%10 oranında cam elyaf katkılı Poliamit 6 (PA6/20M/10CE) kompozitlerin tribolojik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada literatürden farklı olarak PA6 polimer kompozitlerin yüksek performanslı mühendislik polimerleri grubunda yer alan ve yüksek sıcaklıklara dirençli Poli-fenilen-sülfite (PPS) kompozit diskinde karşı tribolojik özellikleri incelenmiştir. Aynı zamanda, polimer matris bünyesine ilave edilen CE ve

mika gibi farklı özelliklere sahip katkı malzemelerinin aşınma hacmi ve sürtünme katsayısı gibi özelliklere etkisi de incelenmiştir.

II. MATERYAL VE METOD

2.1. Malzeme

Bu çalışmada kullanılan ana matris polimer malzemeler katkısız halde iken bile yüksek performans özelliklerine sahip oldukları için seçilmiştir. Bu çalışmada, Domamid ticari kodlu Domopolymer firmasından temin edilen 1.13 g/cm³ yoğunluğa sahip yüksek mukavemet ve tokluğa sahip mühendislik polimeri olan poliamit 6 (PA6) polimeri matris malzemesi olarak temin edilmiştir. Katkı malzemesi olarak kullanılan mika, elektriksel yalıtkanlığı yüksek olan bir katkı malzemesidir. Mika, 2,7 g/cm³ yoğunluklu olup ortalama partikül büyüklüğü 10 mm olup Omya Madencilik firmasından temin edilmiştir. Cam elyaf ise polimerlerde mukavemet artırıcı özelliği olan bir katkıdır. Cam elyaf yüzeyleri üretici firma tarafından amino silan ile kaplanmıştır. Cam elyaflar, 10,5 µm çapında ortalama 3-4.5 mm uzunluğunda kısa cam elyaf olup Cam Elyaf Sanayi/Gebze firmasından temin edilmiştir. %40 cam elyaf takviyeli Poli-fenilen-Sülfite (PPS) kompoziti yüksek sıcaklıklara dayanıklı mühendislik polimerleri sınıfında yer almaktadır. PPS kompoziti, 1,66 g/cm³ yoğunluklu olup Ryton PPS ticari adıyla Solvay firmasından temin edilmiştir.

2.2. Malzeme Üretimi

Mika/Cam elyaf/PA6 kompozit granül üretimleri NR-II-75 tip çift vidalı Werner Pflaiderer marka bir compound makinasında gerçekleştirilmiştir. PA6/cam elyaf granülleri enjeksiyonla şekillendirme öncesinde 80 °C etüvde 4 saat süresince kurutulmuştur. Deney numuneleri 180 bar enjeksiyon basıncında ve 225-245 °C ısıtıcı sıcaklık aralığında ERAT marka bir enjeksiyon makinasında üretilmiştir. Aşınma deneyleri, disk üzerinde pim olacak şekilde dizayn edilmiş bir aşınma cihazında ASTM G99 standardına uygun olarak kuru ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. Tribolojik testlerde, karşı disk olarak %40 cam elyaf takviyeli Poli-fenilen-Sülfite (PPS) kompoziti kullanılmıştır. PPS disk malzemesi enjeksiyonla kalıplama tekniği ile 5 mm kalınlığında ve 100 mm çapında özel olarak dizayn edilmiş bir enjeksiyon kalıbında basılmıştır. PPS kompozit deney numuneleri 200 bar enjeksiyon basıncında ve 300-340 °C ısıtıcı sıcaklık aralığında yine ERAT marka enjeksiyon makinasında basılmıştır. Kalıp sıcaklığı ortalama 40 °C olup enjeksiyonla kalıplama esnasında kalıp ısıtıcısı kullanılmamıştır. PA6/20M ve PA6/20M/10CE kompozitler hem mukavemet hem de elektriksel yalıtkanlık özellikleri ve kullanılma alanı dikkate alınarak üretilmişlerdir.

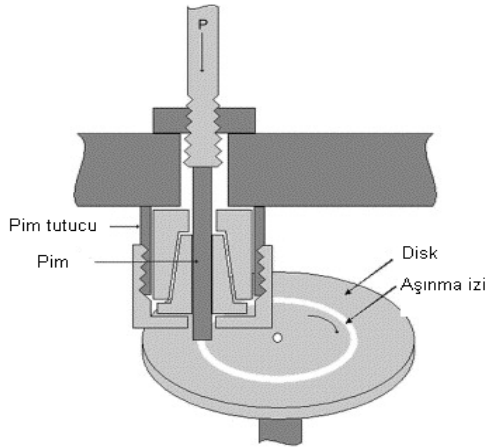
2.3. Aşınma Testleri

Her bir aşınma deneyi öncesi numune pim ağırlığı (m_1) ve sonrası pim ağırlığı (m_2) ölçülmüş ve ağırlık kaybı Δm yani ($m_1 - m_2$) tespit edilmiştir. Aşınma hacmi (V_i) ise Eşitlik (1)'de verilen formül ile hesaplanmıştır. Formülde, ρ ; malzemenin yoğunluğu (g/cm^3)'dur.

$$V_i = \frac{\Delta m}{\rho} \text{ mm}^3 \quad (1)$$

Deneylerde kullanılan pim numuneleri ile karşı PPS polimer kompozit disk arasındaki sürtünme katsayısı (μ), yanal kuvvetin normal kuvvete oranıdır ve Eşitlik (2)'de verilen formül ile hesaplanmıştır. Formülde μ : sürtünme katsayısını, F_s : sürtünme kuvvetini (N) ve F_n ise normal kuvveti (N) göstermektedir. Aşınma deneyleri öncesinde numune ve disk yüzeyleri 1200 nolu zımpara ile düzeltilmiş ve yüzeyler sonrasında aseton ile temizlenmiştir. Pim-disk test cihazı için şematik resim Şekil 1'de gösterilmiştir [21]. Tablo 1'de ise aşınma testi için deney şartları verilmiştir.

$$\mu = F_s / F_n \quad (2)$$



Şekil 1. Pim-disk aşınma test cihazı şematik gösterimi [21]

Tablo 1. Aşınma testleri için deney şartları

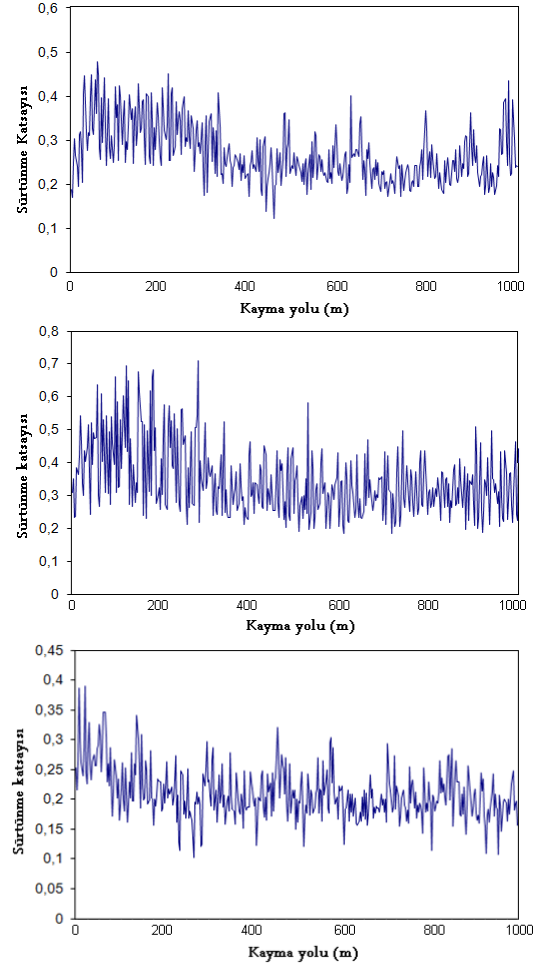
Parametreler	Deney şartları
Kayma hızı (m/s)	0.50
Yük (N)	10, 20, 30
Kayma mesafesi (m)	1000
Sıcaklık (°C)	22±2
Karşı disk malzemesi	%40 cam elyaf takviyeli Poli-fenilen-sülfid (PPS)

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Sürtünme Katsayısı-Kayma Yolu İlişkisi

Mika ve cam elyaf katkıların PA6 esaslı polimer kompozitlerin tribolojik özellikleri üzerine etkisini araştırmak için aşınma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kayma süresi boyunca malzemelerin sürtünme katsayısı değerleri belirlenmiştir. PA6 polimeri ile PA6/20M ve PA6/20M/10CE

kompozitlerin 0,5 m/s kayma hızındaki ve 10 N yük altındaki sürtünme katsayısı değişimleri kayma mesafesine bağlı olarak Şekil 2 a-c'de verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi PA6 kompozitlerin sürtünme katsayısındaki değişimler mika katkı ve CE mukavemet artırıcı katkıya bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 2. Sürtünme katsayısı-kayma yolu grafiği
a) PA6 polimer, b) PA6/20M kompozit,
c) PA6/20M/10CE hibrit kompozit (Yük:10 N, Kayma hızı:0,5 m/s)

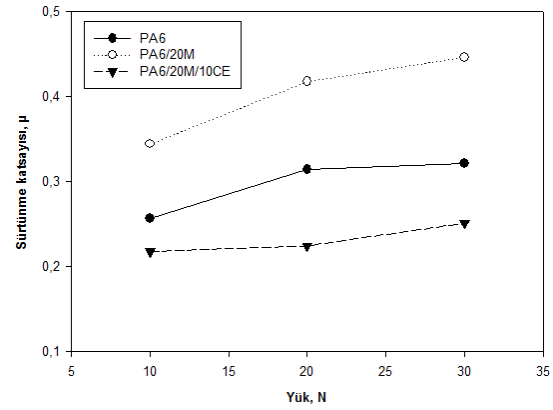
Gerek katkısız PA6 gerekse mikave ve CE katkılı PA6 kompozitlerin kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim eğiliminin benzer olduğu görülmektedir. Yani, sürtünme katsayısı, kaymanın ilk aşamasında hızlı bir şekilde artmakta ve ardından kayma süresi boyunca kararlı olma eğilimine geçmektedir. Yapılan çalışmalarda, kararlı sürtünme aşamasından önce geometrik etki, deformasyon (yumuşama ve plastikleşme) ve malzeme transferi gibi sebeplerle başlangıç aşamasının oluştuğu belirtilmiştir [22-23]. Sürtünme katsayısının kaymanın ilk aşamasında hızlı bir şekilde yükselmesinin nedeni, karşı disk yüzeyinin pürüzlü olması ve pürüzlerin kayma süresince çok fazla oranda mikropulluklanmaya neden olmasıdır. Sürtünme süreci devam ederken, kararlı sürtünme durumuna gelmekte ve sürtünme katsayısı hemen hemen sabit

bir seviyede kalmaktadır. PA6 polimeri ile PA6/20M kompoziti yaklaşık olarak 300 m kayma yolu civarında sabit seviyeye ulaşırken PA6/20M/10CE hibrit kompoziti yaklaşık olarak 200 m kayma yolu civarında ulaşmıştır. Şekillerde görüldüğü gibi PA6 polimerine ilave edilen %20 oranındaki mika sürtünme katsayısını artırırken PA6/20M kompozitine ilave edilen %10 oranındaki cam elyaf sürtünme katsayısını azaltmıştır. Bunun sebebi ise karşı disk yüzeyinde oluşan transfer film tabakası ile açıklanabilir [24-25]. Chukov ve arkadaşları [26] yaptıkları çalışma sonucunda da ÇYMAPE polimerinin kararlı hal aşamasının başlangıç aşamasına göre daha düşük sürtünme katsayısı elde edilmesinin sebebinin transfer film tabakası oluşumu ile açıklanmıştır.

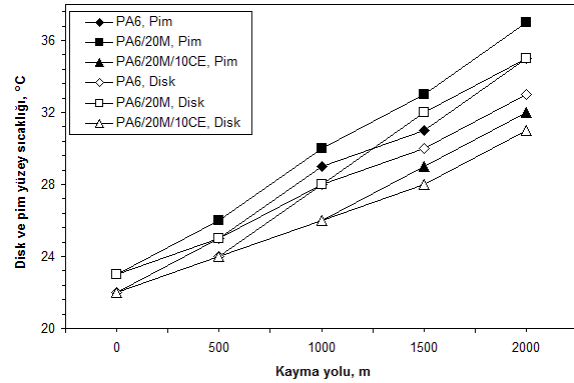
3.2. Sürtünme Katsayısı-Yük İlişkisi

Şekil 3'te PA6 polimeri ile PA6/20M kompozit ve PA6/20M/10CE hibrit kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak %40 cam elyaf takviyeli PPS polimer kompozit diske karşı sürtünme katsayılarındaki değişim verilmiştir. Yapılan çalışmalarda her bir noktadaki hata payının yaklaşık olarak %4-6 aralığında olduğu gözlenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi en yüksek sürtünme katsayısı PA6/20M kompozitinde daha sonra PA 6 polimerinde en düşük sürtünme katsayısı ise PA6/20M/10CE hibrit kompozitinde elde edilmiştir. Buna ilaveten uygulanan yükün artırılması ile deneylerde kullanılan tüm malzemelerin sürtünme katsayısının arttığı belirlenmiştir. Katkısız PA6 polimeri için uygulanan yük değerinin 10 N'dan 30 N'a artırılması ile sürtünme katsayısı %25,2 oranında artmıştır. PA6/20M kompoziti için sürtünme katsayısındaki değişim %29,6 oranında elde edilirken PA6/20M/10CE hibrit kompoziti için bu oran %15,2 oranında artış yönünde elde edilmiştir. Yi-Lan ve arkadaşları [25] tarafından yapılan çalışmada artan yük ile sürtünme katsayısının artmasının sebebi olarak fiberlerin yüksek yüklerde kırılarak abrasif aşınma mekanizmasının daha baskın hale geldiği ve gerçek temas alanının arttığını belirtmişlerdir. PA6 polimeri ilave edilen %20 oranındaki mika katkısı sürtünme katsayısını artırmıştır. Bu artış yüke bağlı olarak değişiklik göstermiş ve sabit 20 N yük altında, PA6/20M kompozitine ilave edilen %10 oranındaki CE ise sürtünme katsayısını %86,1 oranında azaltmıştır. PA6/20M/10CE hibrit kompozitin sürtünme katsayısı katkısız PA6 polimerinin sürtünme katsayısı ile karşılaştırıldığında ise sürtünme katsayısı %39,9 oranında azalmıştır. Bilindiği gibi, polimer kompozit yapısında mevcut olan fiberler, kısmi basıncı paylaşarak gerçek temas alanının azalmasına katkı sağlarlar ve dolayısıyla daha düşük sürtünme katsayısı ve daha düşük aşınma oranı elde edilmektedir [25]. Cam elyaf takviyesi ile tribolojik özelliklerin gelişmesinin bir sebebi olarak kompozitin yüksek mekanik özellikleri ve yumuşak olan PA6 polimerinin deformasyonunun engellenmesi olarak açıklanmıştır [27]. Şekil 4'de PA6 polimeri ile

PA6/20M kompozit ve PA6/20M/10CE hibrit kompozitin 30N yük altında kayma yoluna bağlı olarak %40 cam elyaf takviyeli PPS polimer kompozit diske karşı çalışması durumundaki pim ve disk malzemelerin yüzey sıcaklıklarının değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde deneylerde kullanılan malzemelerin temas halindeki pimve disk yüzey sıcaklıklarının sırasıyla maksimum 35 °C' ve 37 °C' yi geçmediği gözlenmiştir. Bu ise saf PA 6 polimeri camsı geçiş sıcaklığı ($T_g=55$ °C) [28] ile saf PPS polimerinin camsı geçiş sıcaklığının ($T_g=85$ °C) [29] çok altında kaldığını göstermektedir. Yani aşınma deneylerinde pim ve disk temas noktalarında oluşan sıcaklığın polimerin yumuşamasına ve aşınmayı artırmasına etkisi olmadığı düşünülmektedir.



Şekil 3. PA6 polimer, PA6/20M kompoziti ve PA6/20M/10CE hibrit kompozitin PPS polimer kompozit diske karşı sürtünme katsayısı-yol ilişkisi

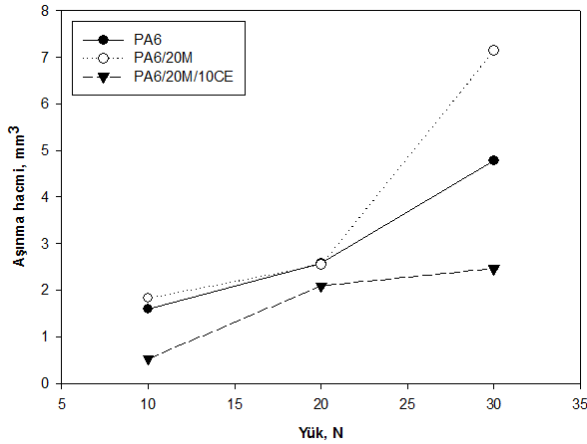


Şekil 4. PA6, PA6/20M kompoziti ve PA6/20M/10CE hibrit kompozitin PPS polimer kompozit diske karşı çalışması durumundaki pim ve disk yüzey sıcaklıklarının değişimi (Yük:30N, Hız:0.5 m/s)

3.3. Aşınma Hacmi-Yük İlişkisi

Şekil 5'te PA6 polimeri ile PA6/20M kompozit ve PA6/20M/10CE hibrit kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak aşınma hacmi değişimleri verilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda her bir noktanın hata payı yaklaşık olarak %3 civarında olduğu tespit edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi uygulanan yükün artması ile aşınma hacminin önemli oranda arttığı belirlenmiştir. Katkısız PA6 polimeri için uygulanan

yük değerinin %200 oranında artırılması ile aşınma hacmi %200 oranında artmıştır. PA6/20M kompoziti için aşınma hacmindeki artış %291,3 oranında elde edilirken PA6/20M/10CE hibrit kompoziti için bu oran %371,4 oranında elde edilmiştir. PA6 polimeri ilave edilen %20 oranındaki mika katkısı düşük yüklerde aşınma hacmini pek etkilemezken 30 N yük altında aşınma hacmi % 49,4 oranında artmıştır. PA6/20M kompozitine ilave edilen %10 oranındaki cam elyaf ise aşınma hacmini %190 oranında azaltmıştır. PA6/20M/10CE hibrit kompozitin aşınma hacmi katkısız PA6 polimerinin sürtünme katsayısı ile karşılaştırıldığında ise aşınma hacmi % 94 oranında azalmıştır. Benzer sonuçlar Autay [30], Venkatesan [31] ve Kunishima [32] tarafından yapılan çalışmalarda da elde edilmiştir. Venkatesan ve arkadaşları [31], cam elyaf ve karbon nanotüp ile güçlendirilmiş hibrit polimer kompozit numunelerde, uygulanan yük ve kayma hızının artmasıyla sürtünme katsayısı ve aşınma oranının arttığını belirtmişlerdir. Kunishima ve arkadaşları [32] ise PA66 polimeri ile cam elyaflar arasındaki yüksek arayüzey kayma direnci nedeniyle kompozitlerin sürtünme katsayısının ve aşınma miktarlarının azaldığını belirtmişlerdir. PA66 polimeri ile cam elyaf arasındaki iyi yapışma aşınma deneyindeki kayma süresince cam elyafların soyulmasını, çiziklerin başlamasını ve ilerlemesini engelleyerek mekanik özellikleri koruduğu ve tribolojik özelliklerin geliştiği belirtilmiştir. Moustafa Mahmoud ve arkadaşları da [5] PA6 polimerine ilave edilen daha rijit olan katkıları nedeniyle kompozitlerin aşınma direncinin arttığını belirtmişlerdir.

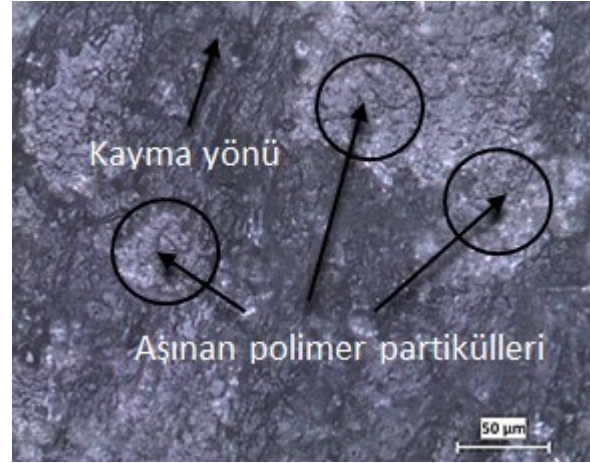


Şekil 5. PA6 polimer, PA6/20M kompoziti ve PA6/20M/10CE hibrit kompozitin PPS polimer kompozit diske karşı aşınma hacmi-yük ilişkisi

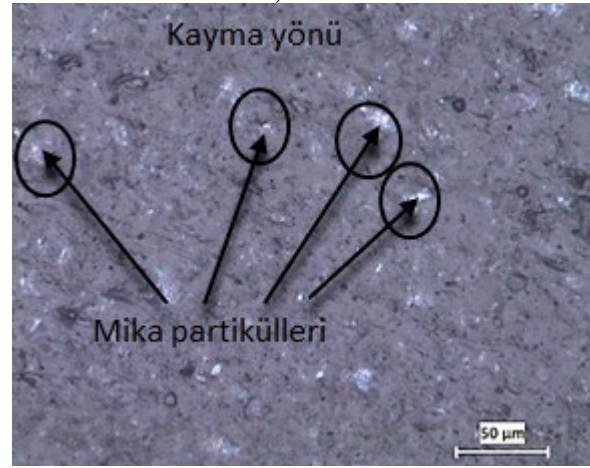
3.4. Mikroyapı İncelemeleri

Şekil 6 a-c'de PA6 polimer, PA6/20M kompoziti ve PA6/20M/10CE hibrit kompozitin %40 cam elyaf takviyeli PPS polimer kompozitine karşı çalışması durumundaki aşınma yüzeyi optik mikroskop mikroyapı görüntüleri verilmiştir. PA 6 polimer ana matris malzemenin %40 cam elyaf takviyeli PPS kompoziti ile teması neticesinde PA6 polimeri aşınmış

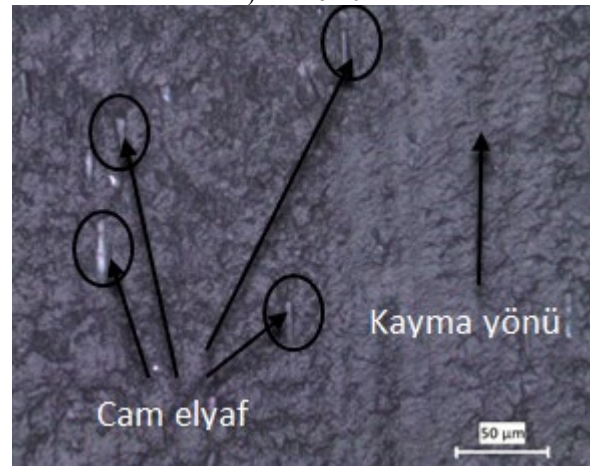
ve aşınan partiküller temas neticesinde PA6 matris yüzeyine yapışmıştır (Şekil 6-a).



a) PA6



b) PA6/20M



c) PA6/20M/10CE

Şekil 6. PA6 polimer, PA6/20M kompoziti ve PA6/20M/10CE hibrit kompozitin PPS polimer kompozitine karşı çalışması durumundaki aşınma yüzeyi optik mikroskop mikroyapı görüntüleri

PA6 polimerine ilave edilen %20 oranındaki mika katkı polimer ana matris malzeme ile iyi bir arayüzey bağı oluşturamamış olup karşı disk malzeme ile temasında mika partikülleri kalkarak aşırı aşınma

oluşumuna sebep olmuştur (Şekil 5). Ana matrizen sıyrılan mika partikülleri karşı disk cam elyaf takviyeli PPS kompozit arasına sıkışarak sürtünme katsayısının artmasına da sebep olmaktadır. (Şekil 3). Sıyrılan mika partikülleri transfer film tabakası oluşumunu azaltmıştır. Artan mika oranının topaklanmaya sebep olduğu ve durumun gerilim yığılmalarını tetiklediği ve aynı zamanda disk yüzeyinde aşınma oranı ve sürtünme katsayısının şekillenmesinde önemli rol oynayan transfer film tabakası oluşumunu azalttığı düşünülmektedir. Bu durum Şekil 6-b'de görüldüğü gibi aşınma yüzeylerinde PPS polimer bünyesindeki cam elyaflar aşınma izlerinin oluşumuna sebep olmuştur. PA6/20M kompozitine ilave edilen %10 oranındaki cam elyafın ise yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı ve polimer matris ile iyi bir bağ yaptığı görülmektedir. Bu durum PA6 kompozitin daha rijit hale gelmesine sebep olmuş ve PA6 bünyesindeki cam elyaflar aşınmaya ve sürtünmeye dirençli hale getirmiştir. Bu durum Şekil 6-c'de görüldüğü gibi PA6/20M/10CE hibrit kompozitin pim aşınma yüzeylerinde daha az aşınma izi oluşmuştur.

IV. SONUÇ

PA6 polimeri ile %20 oranında mika katkılı PA6 ve %20 oranında mika/%10 oranında cam elyaf katkılı PA6 kompozitlerin PPS/40CE polimer kompozitine karşı çalışması durumundaki aşınma özelliklerinin incelendiği çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1.Katkısız PA6 polimeri ile PA6/20M ve PA6/20M/10CE kompozitleri için uygulanan yükün artırılması ile sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla %25,2, %29,6 ve %15,2 oranlarında artmıştır.

2.PA6 polimeri ilave edilen %20 oranındaki mika katkısı sürtünme katsayısını %33,0 oranında artırırken PA6/20M kompozitine ilave edilen %10 oranındaki cam elyaf ise sürtünme katsayısını %86,1 oranında azaltmıştır.

3.PA6/20M kompoziti için uygulanan yükün artması ile aşınma hacmi %291,3 oranında artarken katkısız PA6 polimeri için aşınma hacmi %200 oranında artmış, PA6/20M/10CE hibrit kompoziti için ise %371,4 oranında artış gözlenmiştir.

4.Diğer kombinasyonlara göre kıyaslandığında PPS/40CE-PA6/20M/10CE disk-pim kombinasyonunda en az aşınma hacmi (yani minimum %20 oranında) ve sürtünme katsayısı elde edilirken PPS/40CE-PA6/20M disk-pim kombinasyonunda en fazla aşınma hacmi ve sürtünme katsayısı elde edilmiştir.

5.Elektrik/elektronik sektöründe aşınmanın olduğu uygulamalarda kullanılmak üzere birbirleriyle temas eden ve en az aşınma gösteren PPS/40CE-PA6/20M/10CE kombinasyonu seçilmesi uzun çalışma ömrü açısından önerilebilir.

KAYNAKLAR

[1] Sathees Kumar, S., & Kanagaraj, G., (2016). Investigation on mechanical performances of PA6

and Al₂O₃ reinforced pa6 polymer composites. International Journal of Advanced Engineering Technology, VII(I), 69-74.

- [2] Unal, H., Saylan, T., & Mimaroglu, A., (2014). Thermal, mechanical and tribological performance of polymer composites rubbed against polymer composites in application in electrical contact breakers. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 228(6), 608–615.
- [3] Gyorgy, C., Anna, S., & Dora, J., (2023). Effect of different fillers on thermal conductivity, tribological properties of Polyamide 6. Scientific Reports, 13, 845.
- [4] Mariusz, W., Mirosław, S., & Daniel, P., (2022). E-effect of water absorption on tribological properties of thermoplastics matrix composites reinforced with glass fibres. Advances in Science and Technology Research Journal, 16(2), 232–239.
- [5] Moustafa Mahmoud, Y.Z., Karen, S., Martin, V., & Michael, T.H., (2023). Mechanical and tribological performances of thermoplastic polymers reinforced with glass fibres at variable fibre volume fractions. Polymers, 15, 694.
- [6] Yi, W., & Jun, T., (2021). Development of carbon fiber-reinforced thermoplastics for mass-produced automotive applications in Japan. Journal of Composites Science, 5, 86.
- [7] Dipen, K.R., Pratiksha, H.W., & Emanoil, L., (2021). Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A Review. Polymers, 13, 3721.
- [8] Nuruzzaman, D.M., Iqbal Asif, A.K.M., Oumer, A.N., Ismail, N.M. & Basri, S., (2016). Experimental investigation on the mechanical properties of glass fiber reinforced nylon. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 114, 012118.
- [9] Zaldua N., Jon M., Amaia de la C., Sonia G.A., Cristina E., Isabel H., Agnieszka T., & Alejandro J.M., (2019). Nucleation and crystallization of PA6 composites prepared by T-RTM: Effects of carbon and glass fiber loading. Polymers, 11, 1680.
- [10] Fahmi, A., Jawaid, M., Hassan, A., & Wahit, M.U., (2013). Mechanical properties of mica-filled Polycarbonate/Poly(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) composites. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 52, 727-736.
- [11] Lubomir, L., David, M., Barbora, L., Martin, V., Michal, S., Klara, C., Jakub, V., Kristian, E.W., Richard, W.G., & Neil, A.R., (2018). Effect of filler particle shape on plastic-elastic mechanical behaviour of high density poly (ethylene)/mica and poly (ethylene)/wollastonite composites. Composites Part B, 141, 92-99.

- [12] Deshmukh, S.P., & Rao, A.C., (2012). Mica filled PVC composites: Performance enhancement in dielectric and mechanical properties with treated/untreated mica of different particle size and different concentration. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 11(2), 169-181.
- [13] Suryasarathi, B., & Mahanwar, P.A., (2005). Influence of particle size and particle size distribution on MICA filled nylon 6 composite. *Journal of Materials Science*, 40, 6423–6428.
- [14] Sreekanth, M.S., Joseph, S., Mhaske, S.T. & Mahanwar, P.A., (2011). Effects of mica and fly ash concentration on the properties of polyester Thermoplastic Elastomer Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 24, 317-331.
- [15] Suryasarathi, B., & Mahanwar, P.A. (2004). Effect of Particle Size of Filler on Properties of Nylon-6. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 3(1), 23-31.
- [16] Unal, H., & Mimaroglu, A., (2012). Mechanical and Morphological Properties of Mica and Short Glass Fiber Reinforced Polyamide 6 Composites. *International Journal of Polymeric Materials*, 61, 834-846.
- [17] Gan, D., Lu, S., Caisheng, S. & Zhijian, W. (2001). Mechanical properties and frictional behaviour of a mica-filled poly (aryl ether ketone) composites. *European Polymer Journal*, 37, 1359-1365.
- [18] Pogacnik, A., Kupec, A. & Kalin, M. (2017). Tribological properties of polyamide (PA6) in self-mated contacts and against steel as a stationary and moving body. *Wear*, 378-379, 17–26.
- [19] Unal, H., Abdullah, M. & Ahmet, O. (2017). Friction and wear performance of glass fiber reinforced poly-ether-ether-ketone composite against different polymer counterparts. *MOJ Polymer Science*, 1(5), 188-190.
- [20] Demir, Z., (2013). Tribological performance of polymer composites used in electrical engineering applications. *Bulletin of Materials Science*, 36(2), 341-344.
- [21] Unal, H., Mimaroglu, A. & Serdar, V. (2006). Dry sliding performance of thermoplastics against reinforced unsaturated polyester (BMC): In use in electrical contact breakers components. *Wear*, 261, 841–847.
- [22] Samyn, P., De Baets, P. & Schoukens, G. (2009). Influence of internal lubricants (PTFE and silicon oil) in short carbon fibre-reinforced polyimide composites on performance properties. *Tribology Letters*, 36(2), 135-146.
- [23] Wei, L., Qi, L., Yi, L., Shengtai, Z., Huawei, Z., & Mei, L. (2016). Enhanced mechanical and tribological properties in polyphenylene sulfide/polytetrafluoroethylene composites reinforced by short carbon fiber. *Composites Part B*, 91, 579-588
- [24] Shaofeng, Z., Qiaoxin, Z., Chaoqun W., & Jin H. (2013). Effect of carbon fiber reinforcement on the mechanical and tribological properties of polyamide6/polyphenylene sulfide composites. *Materials and Design*, 44, 493–499.
- [25] Yi-Lan, Y., Du-Xin, L., Gao-Jie, S., Ruo-Yun, L., & Xin, D., (2016). Improvement in the tribological properties of polyamide 6: Talc, glass fiber, graphite, and ultrahigh-molecular-weight polyethylene. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 29(4), 494–507.
- [26] Chukov, D. I., Stepashkin, A.A., Maksimkin, A.V., Tcherdyntsev, V.V., Kaloshkin, S. D., Kuskov, K.V., & Bugakov, V.I., (2015). Investigation of structure, mechanical and tribological properties of short carbon fiber reinforced UHMWPE-matrix composites. *Composites Part B*, 76, 79-88.
- [27] Li, D. X., Xie, Y., Li, W.J., Yilan, Y., & Xin, D., (2013). Tribological and mechanical behaviors of polyamide 6/glass fiber composite filled with various solid lubricants. *The Scientific World Journal*, 2013, 320837.
- [28] Unal H, Kaya U.A., Esmer K, Mimaroglu, A, Poyraz, B., (2016). Influence of wax content on the electrical, thermal and tribological behaviour of a polyamide 6/graphite composite, *J Polymer Engineering*, 36(3), 279–286.
- [29] https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/2018-08/Ryton-PPS-Types_EN-v1.2_0.pdf
- [30] Autay, R., Missaoui, S., Mars, J., & Dammak, F., (2019). Mechanical and tribological study of short glass fiber-reinforced PA 66. *Polymers and Polymer Composites*, 27(9), 587–596.
- [31] Venkatesan, M., Palanikumar, K., & Rajendra Boopathy, S., (2017). Experimental investigation and analysis on the wear properties of glass fiber and CNT reinforced hybrid polymer composites. *Science Engineering Composite Materials*, 1-12.
- [32] Kunishima, T., Yasuharu, N., Setsuo, N., Takanori, K., Gaetan, B., Jean-Christophe, A., Vincent, F., & Philippe, K. (2020). Effects of glass fiber properties and polymer molecular mass on the mechanical and tribological properties of a polyamide-66-based composite in contact with carbon steel under grease lubrication. *Wear*, 462-463, 203500.

Retina Damar Segmentasyonunda Sinir Mimarisi Arama İçin Farklı Kodlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Comparison of Different Encoding Methods for Neural Architecture Search in Retinal Vessel Segmentation

Zeki KUŞ¹ , Berna KİRAZ¹ 

Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Öz

Retinal kan damar segmentasyonu diyabetik retinopati ve yaşa bağlı makula dejenerasyonu gibi göz hastalıklarının tespiti ve incelemesi açısından kritik bir görevdir. U-şekilli derin sinir ağlarının bu görev için başarılı sonuçlar verdiği bilinmektedir; fakat bu ağların optimize edilmesi gereken bir çok hiper-parametresi bulunmaktadır. Bu ağların otomatik bir şekilde optimizasyonu ve aranması için birçok sinir mimarisi arama (SMA) çalışması gerçekleştirilmiştir. SMA çalışmaları incelendiğinde seçilen kodlama şemalarının üretilen ağların karmaşıklığını ve performansını doğrudan etkilediği görülmüştür. Bu çalışmada, retinal kan damar segmentasyonu için sunduğumuz iki SMA çalışmasında (UNAS-Net ve MedUNAS) önerilen kodlama şemalarının performansları herkese açık olarak yayınlanan iki farklı retinal kan damar segmentasyonu veri kümesi üzerinde karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, önerilen her iki yöntemin temel alınan U-Net'ten 25 kata kadar daha az parametre ile tüm ölçütler açısından daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, SMA çalışmaları ile kıyaslandığında UNAS-Net'in 54,19 kata kadar daha az parametreyle ACC, SEN ve F1 değerleri açısından daha iyi sonuçlar ürettiği, benzer şekilde MedUNAS'ın 13,22 kata kadar daha az parametreye sahip model ile aynı metrikler açısından daha iyi sonuçlar elde edebildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Retina Damar Segmentasyonu, Sinir Mimarisi Arama, Kodlama, Karşıtlık Temelli Diferansiyel Gelişim

Abstract

Retinal blood vessel segmentation is critical for detecting and investigating eye diseases such as diabetic retinopathy and age-related macular degeneration. U-shaped deep neural networks are known to give good results for this task, but these networks have many hyper-parameters that need to be optimized. Many neural architecture search (NAS) studies have been conducted to optimize and search these networks automatically. These studies have shown that the coding schemes used affect the complexity and performance of the generated networks. In this study, we compare the performance of the coding schemes proposed in two NAS for retinal blood vessel segmentation (UNAS-Net and MedUNAS) on two publicly released retinal blood vessel segmentation datasets. The results show that both methods outperform the baseline U-Net in all metrics with up to 25 times fewer parameters. Compared to NAS studies, UNAS-Net has shown better performance in terms of ACC, SEN, and F1 values with up to 54,19 times fewer parameters. Similarly, MedUNAS has achieved better results in terms of the same metrics with up to 13,22 times fewer parameters.

Keywords: Retinal Vessel Segmentation, Neural Architecture Search, Encoding, Opposition Based Differential Evolution

I. GİRİŞ

Medikal görüntü analizinde önemli bir görev olan retinal kan damarı segmentasyonu, fundus görüntülerinden kan damarlarının tespit edilmesini içermektedir. Retinal vasküler hastalıkların teşhis ve takibinde kritik bir rol oynadığı için, bu işlem özellikle diyabetik retinopati ve yaşa bağlı makula dejenerasyonu gibi hastalıkların teşhisi ve izlenmesi için kritik öneme sahiptir [1]. Ancak, kan damarlarının karmaşık yapısı ve değişken görünümü sahip olmasından dolayı retinal damar segmentasyonu zor bir işlemdir [2]. Bu sebeple, gürbüz ve etkili algoritmalar geliştirme ihtiyacı, retinal damar segmentasyonu problemini sıcak ve çok çalışılan bir konu haline getirmiştir.

Literatürde, U-Net [3] gibi U-şekilli derin sinir ağı modellerinin retinal damar segmentasyonu problemi için başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [4, 5, 6]. Bu nedenle U-Net ve Attention U-Net gibi varyasyonlar, yapılan segmentasyon çalışmalarında temel alınan yöntem olarak seçilmektedir. Ancak, U-Net optimize edilmesi gereken birçok hiper-parametreye sahiptir ve elle tasarlanan bir ağ olduğu için statik bir yapıya sahiptir.

Bu tasarım sorunları, retinal kan damarlarının karmaşık yapısı ve değişken görünümü nedeniyle farklı kalınlıklara sahip retinal damarların segmentasyonu için dezavantajlara neden olabilir [7]. Aynı zamanda, eğitilebilir parametre sayısının fazla olması eğitim ve çıkarım sürelerini arttırmaktadır. Bu durumlar sebebiyle, otomatik retinal damar segmentasyonu gerçekleştirecek sinir mimarilerinin araştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Sinir mimarisi arama (SMA) çalışmaları, otomatik yapay öğrenme (AutoML) çalışmalarının bir alt kümesidir. Verilen bir problem için tanımlanan arama uzayı sınırları dahilinde seçilen arama yöntemi ile otomatik bir şekilde derin sinir ağı mimarisinin araştırılması hedeflenmektedir. SMA için pekiştirmeli öğrenme [8, 9], gradyan tabanlı [10] ve evrimsel yöntemlere [11, 12] dayalı yaklaşımlar önerilmiş ve arama maliyeti ve başarısı açısından evrimsel yöntemlerin daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Retinal kan damar segmentasyonu için birçok sinir mimarisi arama çalışması gerçekleştirilmiştir [13 - 15]. Bu çalışmalarda en iyi sinir ağı mimarilerini aramak için genetik algoritma gibi meta-sezgisel yöntemler kullanılmış ve başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [18].

Chen vd. (2021) [4] tarafından gerçekleştirilen çalışma U-Net [3] gibi U-şekilli derin sinir ağı modellerinin retinal damar segmentasyonu problemi için başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Zhou vd. tarafından yapılan çalışmada “*Çalışma Grubu Öğrenimi (SGL)*”[5] isimli yeni bir metod önerilmiş ve bu metodun gürültü içeren referans görüntüleri için temel alınan U-Net’in segmentasyon performansını hassasiyet, dice skoru, doğruluk ve AUC metrikleri açısından sırasıyla 8,5; 2,7; 0,2 ve 0,5 puan iyileştirdiği ve daha gürbüz hale getirdiği görülmüştür. Wentao vd. (2022) [6] tarafından yapılan çalışmada ise ince damar görüntüleri ve düşük ışıpta görüntüleme gibi önemli problemler için etkili bir şekilde segmentasyon gerçekleştirebilen yeni bir teknik tanıtılmış ve “*FR-UNet*” olarak isimlendirilmiştir. *FR-UNet*, yatay ve dikey yönde ağı genişletmek için çok çözünürlüklü bir evrişim mekanizması içerir ve piksel düzeyinde doğru bir temsil sağlamak için özellik toplama modülüne ve değiştirilmiş artık bloklara sahiptir.

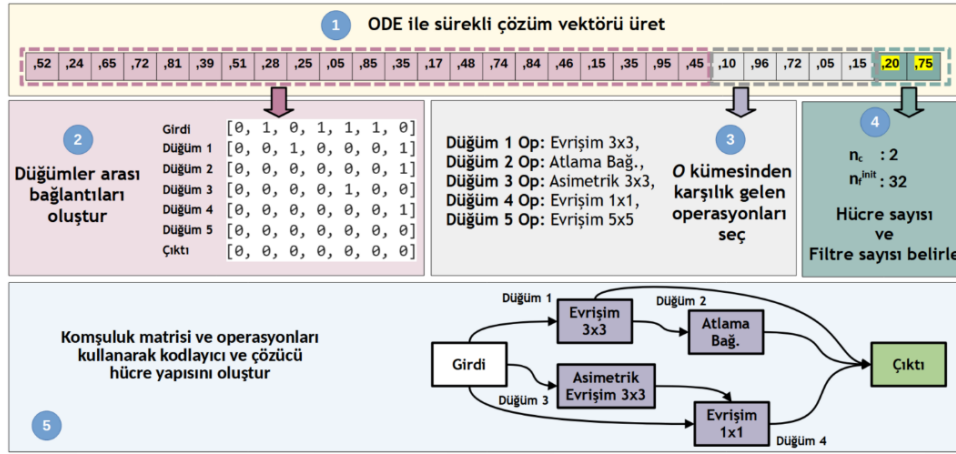
Bu çalışmalar yanında retinal damar segmentasyonu için üst-sezgiseller ile sinir mimarisi arama işlemi gerçekleştiren çalışmalar da yapılmaktadır. Houreh vd. (2021) [13] tarafından sunulan “*Hiper Sinirsel Mimari Arama (HNAS)*” yöntemi, retinal kan damarı segmentasyonu için genetik algoritma yöntemini kullanarak U-şekilli sinir ağları için SMA işlemi gerçekleştirmiştir. *HNAS*, *DRIVE* veri kümesi üzerinde test edilmiş ve daha az karmaşık ağlar ile

literatürdeki çalışmalara kıyasla yüksek rekabetçi sonuçlar elde edilmiştir. Wei vd. (2022) [14] tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise retinal damar segmentasyonu için U-şeklinde sinir ağları üreten “*Genetik U-Net*” adında bir SMA yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem, daha az parametre ile segmentasyon başarısını arttırmayı hedeflemiştir. Yüksek segmentasyon başarısına sahip mimarileri oluşturabilmek için, önerilen yöntem, genetik algoritmayı geliştirmiş ve daha az kısıtlı bir arama uzayı kullanmıştır. Deney sonuçları, Genetik U-Net kullanılarak elde edilen mimarilerin, diğer çalışmalara göre daha az karmaşık modeller ile daha yüksek segmentasyon başarısı elde edebildiğini göstermektedir. “*BTLBO*”[15], Rajesh vd. tarafından geliştirilen bir optimizasyon yöntemi olarak, evrimsel algoritmalarla birlikte arama algoritmaları arasında yer almaktadır. Önerilen çalışmada, SMA adımlarını hızlandırmak için arama uzayı, dikkat mekanizması ve önbellek sistemi ile U-şeklindeki mimarilerin otomatik optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. “*BTU-Net*” olarak isimlendirilen bu yaklaşım farklı retinal kan damar veri kümeleri üzerinde değerlendirilmiş ve diğer çalışmalara kıyasla daha iyi segmentasyon performansı göstermiştir. Önerilen teknik, çeşitli retinal damar segmentasyonu veri kümelerinde test edilmiş ve daha az parametre ile literatürdeki çalışmalardan daha iyi performans göstermiştir.

Bu çalışmada, U-şekilli mimariler için SMA işlemi gerçekleştirilmiş ve önerdiğimiz bu mimarilerin oluşturulması için kullanılan farklı kodlama stratejilerinin performansı retinal kan damar segmentasyonu veri kümeleri üzerinde karşılaştırılmıştır. Farklı mimarilerin arama uzayında araştırılması için meta-sezgisel yöntem olarak “*Karşıtlık Temelli Diferansiyel Gelişim*” yöntemi kullanılmıştır. UNAS-Net [16] ve MedUNAS [17] yöntemlerinde kullanılan kodlama şemaları karşılaştırıldığında UNAS-Net çalışmasında önerilen stratejinin en az %50 daha az parametre ile rekabetçi sonuçlar elde ettiği gözlemlenmiştir.

II. MATERYAL VE METOD

Yapılan çalışmada, U-şekilli mimarilerin eniyilemesi için önerdiğimiz UNAS-Net [16] ve MedUNAS [17] yöntemleri karşılaştırılmıştır. Her iki yöntem de hücre tabanlı kodlayıcı ve kod çözücü hücrelere sahip U-şekilli bir yapıdır. Bu yapılar, hücre tabanlı mikro arama uzayı aracılığıyla hücrenin yapısını belirlerken, makro arama uzayı aracılığıyla toplam hücre sayısı ve ilk hücredeki özellik haritalarının sayısını belirlemektedir. Karşılaştırılan yapılar, kodlayıcı ve kod çözücü hücrelerden oluşur. Kodlayıcı hücreler özellikleri çıkarıp görüntü boyutunu azaltırken, kod çözücü hücreler çıkarılan özelliklerden görüntüyü



Şekil 1. UNAS-Net kodlama şeması adımları

yeniden inşa edip görüntü boyutunu artırır. Girdi görüntüsü bir dizi kodlayıcı ve kod çözücü hücreden geçirildikten sonra 2-boyutlu (2B) evrişim ve sigmoid aktivasyonu uygulanarak segmente edilmiş görüntü oluşturulur. Her iki yöntemde de kodlayıcı ve kod çözücü hücreler döngü içermeyen yönlü çizgeler (DAG - directed acyclic graph $G = (N, E)$) ile temsil edilmektedir. UNAS-Net ve MedUNAS, sinir mimarisi yapısı açısından benzer olsalar da kodlama şeması ve hücre yapısı açısından birbirinden farklılaşmaktadır. Ayrıca farklı mimarilerin arama uzayında araştırılması için Karşıtlık Temelli Diferansiyel Gelişim (Opposition-based differential evolution - ODE) algoritması kullanılmıştır. Bu bölümde bu iki yöntem için kullanılan arama uzayı ve kodlama şemalarından ve ODE algoritmasının genel yapısından bahsedilmiştir.

2.1. UNAS-Net

2.1.1 Arama uzayı

UNAS-Net [16] çalışmasında, arama uzayını iki kısma ayırdık. Birinci kısımda, kodlayıcı ve kod çözücü hücreleri oluşturan yapı için arama işlemi gerçekleştirilir ve mikro arama uzayı olarak isimlendirilir. Makro arama uzayı olarak isimlendirilen ikinci kısımda ise UNAS-Net yapısında kullanılacak hücre sayısı ve özellik haritalarının sayısı optimize edilir.

UNAS-Net yapısında hücreler, N adet düğüm ve E adet kenardan oluşur. Her bir hücre bir girdi, bir çıktı ve en fazla 5 adet ara düğümden (Şekil 1 mor renkli düğümler) oluşur. Bu yapıda, ara düğümler gelen girdiye uygulanacak işlemi/operasyonu temsil ederken, kenarlar ise düğümler arasındaki bilgi akışını göstermektedir. Her bir ara düğüm uygulanacak işlemi belirten bir $l \in L$ etiketine sahiptir ve bu kümedeki işlemler DARTS [12] makalesi referans alınarak seçilmiştir. L kümesindeki elemanlar Tablo 1'de gösterilmiştir.

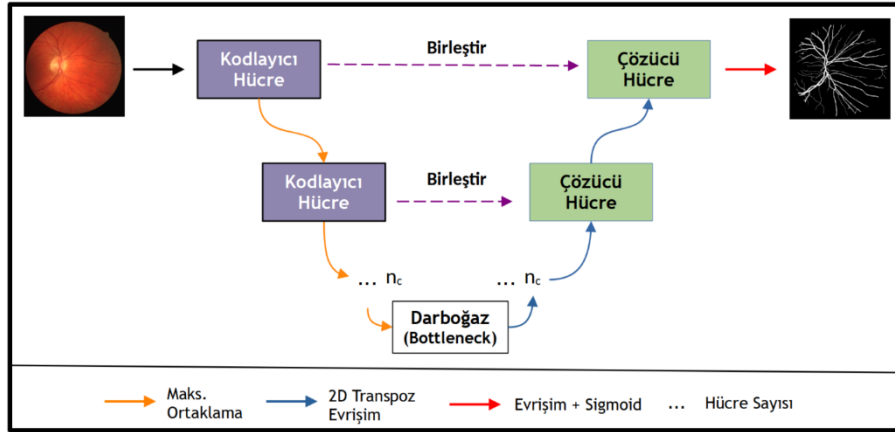
Tablo 1. Ara düğümler için seçebilecek olası işlemler

Operasyon Adı
1x1 2B Evrişim (1x1 conv)
3x3 2B Evrişim (3x3 conv)
5x5 2B Evrişim (5x5 conv)
7x7 2B Evrişim (7x7 conv)
3x3 2B Derinlemesine Ayrılabilir Evrişim (3x3 depconv)
5x5 2B Derinlemesine Ayrılabilir Evrişim (5x5 depconv)
7x7 2B Derinlemesine Ayrılabilir Evrişim (7x7 depconv)
3x3 2B Açılan Evrişim (3x3 dilconv)
5x5 2B Açılan Evrişim (5x5 dilconv)
7x7 2B Açılan Evrişim (7x7 dilconv)
3x3 2B Asimetrik Evrişim (3x3 asymconv)
5x5 2B Asimetrik Evrişim (5x5 asymconv)
7x7 2B Asimetrik Evrişim (7x7 asymconv)
Atlama bağlantısı (Skip-Connection - skip)

Arama uzayının küçültülmesi amacıyla düğüm ($|N| \leq 7$), kenar ($|E| \leq 9$) ve olası işlem sayısı ($|L| \leq 14$) sınırlandırılmıştır. N , E ve L kümeleri hücre tabanlı mikro arama uzayını oluştururken hücre sayısı ($n_c \in \{2, 3, 4, 5\}$) ve ilk hücredeki özellik haritalarının sayısını ($n_f^{init} \in \{8, 16, 32\}$) belirleyen iki karar değişkeni de makro arama uzayını oluşturur. UNAS-Net çalışmasından farklı olarak bu çalışmada daha iyi sonuç gösterdiği için girdi düğümünün çıktı düğümüne bağlı olması zorunlu tutulmuştur.

2.1.2 Kodlama şeması

Her bir çözüm vektörü toplamda 28 elemandan oluşan gerçek değerli vektörler ile temsil edilir. Bu çözüm vektöründeki ilk 21 eleman hücre yapısı içerisindeki düğümlerin birbirine nasıl bağlandığını, sonraki 5 eleman ara düğümler için seçilen operasyonları ve son iki eleman da sırasıyla makro arama uzayındaki n_c ve n_f^{init} karar değişkenlerini



Şekil 2. UNAS-Net ve MedUNAS için kullanılan U-şekilli mimarinin genel yapısı

temsil eder. Hücre yapısı DAG ile temsil edildiği için, DAG'ı tanımlamak amacıyla komşuluk matrisi kullanılmıştır. Maksimum 7 düğümden oluşan hücre yapısındaki komşuluklar, 7×7 'lik komşuluk matrisinin üst-üçgensel alanı ile temsil edilmiştir ve bu matriste 0 ve 1 değerleri iki düğümün birbirine bağlı olup olmadığını göstermek için kullanılır.

Gerçek değerlerden oluşan çözüm vektöründen UNAS-Net mimarisini oluşturmak için eşleme işlemi gerekmektedir. Şekil 1'de gösterilen bu eşleme adımları 5 adımda gerçekleştirilmektedir.

1. İlk adımda her biri $[0, 1]$ aralığında rastgele değerlerden oluşan 28 elemanlı çözüm vektörü oluşturulur.
2. Vektördeki ilk 21 eleman komşuluk matrisinin oluşturulması için kullanılır ve düğümler arasında bağlantı olup olmadığını belirtir. Bağlantı olup olmadığını ikili bir değer (0 ise bağlantı yok, 1 ise var) ile temsil edilebileceğinden $[0, 1]$ uzayı iki eşit parçaya bölünür: Çözüm vektöründe karşılık gelen gerçek değer $[0, 0,5)$ aralığında ise iki düğüm arasında bağlantı yok; $[0,5, 1)$ ise bağlantı vardır. Örneğin: Şekil 1 'de çözüm vektöründeki ilk eleman Girdi ve Düğüm 1 arasında bağlantı olup olmadığını temsil eder. Bu vektördeki ilk değer 0,52 olduğu için komşuluk matrisinin üst-üçgensel alanındaki ilk değer (birinci satır, ikinci sütun) 1 olur. Benzer şekilde, vektördeki ikinci değer 0,24 olup Girdi ile Düğüm 2 arasında bağlantı olmadığını temsil eder ve komşuluk matrisinin birinci satır, üçüncü sütunundaki değer 0 olarak işaretlenir.
3. Çözüm vektöründe bulunan sonraki 5 eleman her bir ara düğüm için seçilen işlemleri temsil eder ve bu değerler için yine benzer şekilde eşleme işlemi gerçekleştirilir. L kümesinde 14 olası işlem olduğu için $[0, 1]$ aralığı 14 eşit parçaya bölünür: $[0, 0,07)$ aralığı 1×1

filtre boyutuna sahip evrilim işlemine; $[0,07, 0,14)$ aralığı 3×3 filtre boyutuna sahip evrilim işlemine karşılık gelmektedir. Örneğin: Çözüm vektöründeki 22. eleman 0,10 olduğu için $[0,07, 0,14)$ aralığına düşer ve bu aralığa karşılık gelen 3×3 filtre boyutuna sahip evrilim işlemi Düğüm 1 için seçilen işlem olur. Diğer tüm düğümler için benzer işlemler gerçekleştirilir.

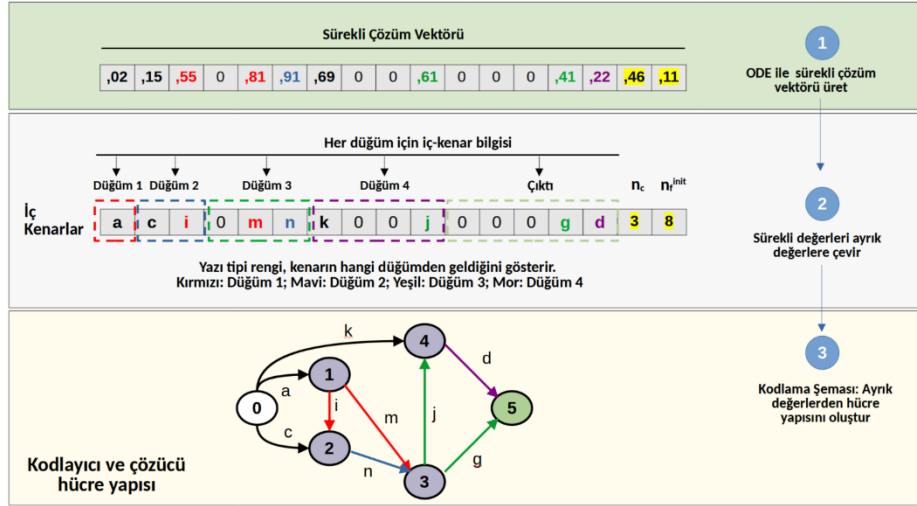
4. Çözüm vektöründeki son iki eleman ise n_c ve n_f^{init} karar değişkenlerine karşılık gelmektedir. n_c için seçilebilecek 4 eleman vardır. Bu nedenle $[0, 1]$ aralığı 4 eşit parçaya bölünür ($[0, 0,25)$ aralığı 2 değerine, $[0,25, 0,50)$ aralığı 3 değerine karşılık gelir vb.). Örneğin: Vektördeki 27. Eleman 0,20 olduğu için $[0, 0,25)$ aralığına düşer ve n_c için 2 değeri seçilir. Benzer şekilde n_f^{init} için ise seçilebilecek 3 değer vardır ve aralık 3 eşit parçaya bölünür ($[0, 0,33)$ aralığı 8; $[0,33, 0,66)$ aralığı 16 değerine karşılık gelir vb.). Benzer şekilde, çözüm vektöründeki 28. eleman 0,75 olduğu için $[0,66, 1)$ aralığına düşer ve n_f^{init} için 32 değeri seçilir.
5. Adım 2 ve 3'te oluşturulan komşuluk matrisi ve seçilen operasyonlar kullanılarak kodlayıcı ve kod çözücü hücrenin yapısı oluşturulur.

Şekil 1'de gösterilen tüm adımlar (1-5) tamamlandıktan sonra oluşturulan hücre yapısı kullanılarak Şekil 2'de gösterilen UNAS-Net mimarisi oluşturulur.

2.2. MedUNAS

2.2.1. Arama uzayı

MedUNAS yapısında, kodlayıcı ve kod çözücü hücreler, N adet düğüm, E adet kenar ve O adet operasyondan oluşur. Her hücre, bir girdi düğümü,



Şekil 3. MedUNAS kodlama şeması adımları

4 ara düğüm ve bir çıktı düğümü içermektedir. Ara düğümler farklı düğümlerden gelen çıktıların toplama işlemi ile birleştirildiği noktalar ve kenarlar ise ara düğümden gelen bilgiye uygulanan operasyonu belirtir. Her ara düğüm ($n \in N \setminus \{n_1\}$), kendinden önce gelen düğümlerden gelebilecek 2 iç-kenara (in-edge) sahiptir. Bu kenarlar için seçilebilecek 15 olası işlem (O) vardır ve bu işlemler $a-o$ arasındaki karakterler ile temsil edilir. O kümesindeki işlemler Tablo 1'de gösterilen L kümesinde farklı olarak o işlemi eklenmiştir ve bu işlem ise bir bağlantı olmadığını (2 iç kenar kısıtlamasını sağlarken karmaşıklığı azaltmak için kullanılır) temsil etmek için kullanılır.

MedUNAS mimarisi, kodlayıcı ve kod çözücü hücrelerin eşit sayıda bulunduğu bir mimaridir. Bu mimaride, hücre sayısı ve ilk hücredeki özellik haritalarının sayısı SMA'ya dahil edilen iki temel karar değişkenidir. Hücre sayısı ($n_c \in \{2, 3, 4, 5\}$), kodlayıcı ve kod çözücü hücre sayısını belirlemek için kullanılan bir değişkendir. İlk hücredeki özellik haritalarının sayısı ($n_f^{mit} \in \{8, 16, 32\}$) ise, ağın performansını etkileyen bir diğer değişkendir ve her maksimum havuzlama işleminden sonra iki katına çıkarılır.

2.2.2. Kodlama şeması

Dong vd. (2022) [18], işlem ve bağlantı bilgilerini temsil etmek için hem alfabe hem de "0" dizelerini kullanan bir çözüm kodlaması önermiştir. Yapılan çalışmada, önerilen bu kodlama şeması ODE için modifiye edilmiştir. Her bir çözüm 17 elemandan oluşan gerçek değerlere sahip bir vektör ($\in [0, 1]$) kullanılarak temsil edilir. Bu vektördeki ilk 15 değer, her bir düğüm arasındaki bilgi akışını ve her bir kenar için seçilen işlemleri ifade eder. Son iki değişken ise kodlayıcı/çözücü hücre sayısını (n_c) ve ilk hücredeki özellik haritası sayısını (n_f^{mit}) belirtir. Üretilen çözüm vektöründen, hücre yapısının nasıl oluşturulduğu Şekil 3'te gösterilmiştir.

Bu çözüm kodlamasında kenarlar işlemleri, düğümler ise farklı işlemlerden elde edilen çıktıları göstermektedir. Şekil 3'te " $a-ci-0mn-k00j-000gd$ " kodlaması kullanılarak oluşturulmuş örnek bir hücre yapısı gösterilmiştir. Çözüm kodlamasının ilk biti Düğüm 1'e gelen iç-kenar (in-edge) bilgisini ve bu iç-kenar için seçilen işlemi belirtir. Sonraki iki bit Düğüm 2'ye gelen iç-kenar bilgisi ve seçilen işlemleri belirtir ve bu şekilde devam eder. Son olarak, son beş bit Düğüm 5 için iç-kenar ve seçilen işlem bilgisini içerir. Örneğin, " $k00j$ " bitleri Düğüm 4 için dört olası iç-kenar bağlantısını (Düğüm 0, Düğüm 1, Düğüm 2, Düğüm 3) ve bu olası iç-kenar bağlantıları için seçilen işlemleri gösterir. " $k00j$ " bitlerine göre şu düğümler arasında bir bağlantı yoktur: Düğüm 1 – Düğüm 4; Düğüm 2 – Düğüm 4 (Şekil 3'e bakınız). Yine bu kodlama için; Düğüm 4, Düğüm 0 ve Düğüm 3'ten bilgi alır ve sırasıyla alınan bu bilgilere k ve j işlemlerini uygular. Uygulanan işlemler sonucunda elde edilen bilgiler ise toplama operatörü ile birleştirilip Düğüm 4'te toplanır.

MedUNAS yapısı için ODE tarafından üretilen çözüm vektöründen hücre yapısının oluşturulması amacıyla eşleme aşaması gerekmektedir. Bu çalışmada, Awad vd. (2020) [19] tarafından önerilen eşleme yöntemi kullanılmıştır. İlk adımda, sıfırlarla dolu 17 elemandan oluşan bir çözüm vektörü oluşturulur. Bu vektördeki, ilk 15 eleman maksimum 2 iç-kenar kısıtlaması ve her düğüm için olası bağlantı sayısı dikkate alınarak rastgele üretilen gerçek değerlerle değiştirilir. Her düğüm için olası iç kenar sayısı farklı renkli kesikli çizgilerle gösterilmiştir (Şekil 3). Örneğin, kırmızı kesikli çizgi Düğüm 1 için olası iç-kenarları gösterirken, yeşil kesikli çizgi Düğüm 3 için 3 olası iç-kenarı göstermektedir. Düğüm 1 için yalnızca bir olası iç-kenar vardır. Bu sebeple, $[0, 1]$ aralığında bir tane gerçek değerli rastgele sayı üretilir (Şekil 3'te bu değer 0,02'dir). Bu iç-kenar için on beş olası işlem olduğundan, 0 ile 1 arasındaki değerler, her biri belirli bir işleme karşılık gelen on beş eşdeğer bölmeyle ayrılır. İlk bölme $[0, 0,067)$; " $a : 1 \times 1$ 2B Evrişim"

işlemini gösterirken, ikinci bölme $[0,067, 0,133]$; {"b : 3×3 2B Evrişim"} işlemine karşılık gelir ve bu şekilde devam eder. Şekil 3'te gösterilen $0,02$ değeri ilk bölmedeki işleme karşılık geldiğinden a işlemi ilk eleman için seçilmiştir. Benzer şekilde, aynı şekil üzerindeki çözüm vektöründe gösterilen 4 ile 6 arasındaki elemanlar Düğüm 3 için olası iç-kenarları gösterir. Düğüm 3'ün üç olası iç-kenarı vardır ve bunlardan ikisi rastgele seçilmelidir (iki iç kenar kısıtı). Bu nedenle, $[0, 1]$ aralığında iki sayı rastgele üretilir (Şekil 3'te $0,81$ ve $0,91$) ve bu iki iç-kenar için sırasıyla m ve n işlemleri seçilir. Son iki eleman ise; n_c ve n_f^{init} karar değişkenlerine karşılık gelir. n_c için dört değer ve n_f^{init} için üç değer vardır, bu nedenle $[0, 1]$ aralığı sırasıyla eşit büyüklükte dört ve üç parçaya bölünür. Ardından, Şekil 3'te gösterildiği gibi (sarı vurgulu) bu karar değişkenleri için karşılık gelen değerler seçilir. Hücre yapısının ardından Şekil 2'de gösterilen MedUNAS mimarisi oluşturulur.

2.3. Karşıtlık Temelli Diferansiyel Gelişim (Opposition-based Differential Evolution - ODE)

Rahnamayan vd. (2008) [20] tarafından geliştirilen ODE yöntemi, popülasyon başlatma ve oluşturma aşamalarında karşıtlığa dayalı öğrenme (Karşıtlık Temelli Öğrenme - Opposition Based Learning - OBL) yöntemi kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada, ODE için $DE/rand/1/bin$ kullanılmıştır. Dört adımdan oluşan bir yöntem olan karşıtlık temelli başlatma sırasıyla şu adımları gerçekleştirilir: Birinci adımda, rastgele bir şekilde P başlangıç popülasyonu oluşturulur. İkinci adımda ise her çözümün karşıtını hesaplamak için başlangıç popülasyonunun karşıtı olan OP oluşturulur. Verilen bir çözüm için karşıt çözümün üretilmesi denklem 1'e göre gerçekleştirilir. Denklem 1'de, $P_{i,G}^k$ ve $OP_{i,G}^k$, G jenerasyonu için mevcut popülasyon ve karşıt popülasyondaki i . çözümün k . karar değişkenini; l^k ve u^k , k . karar değişkeninin alt ve üst sınırlarını; D karar değişkenlerinin sayısını ve NP popülasyon büyüklüğünü temsil etmektedir.

$$OP_{i,G}^k = l^k + u^k - P_{i,G}^k \quad (1)$$

$for i: \{1, \dots, NP\}; k: \{1, \dots, D\}$

Bu problem için, üretilen her birey $[0, 1]$ aralığında sürekli değerlerden oluşur. Bu nedenle l^k ve u^k sırasıyla 0 ve 1 değerlerini alır. Sonuç olarak karşıt çözümler tüm karar değişkenlerinden bir değerinin çıkarılmasıyla oluşturulur. Üçüncü adımda P ve OP birleştirilir ve dördüncü adımda birleştirilen kümeden en iyi NP adet çözüm seçilir. Ayrıca ODE yönteminde belirli adımlarda, JR olasılığına bağlı olarak nesil atlama adımı gerçekleştirilir. Bu nesil atlama adımında, P 'nin karşıtı olan OP hesaplanır. Ancak burada, k . karar değişkeni için sabit değerler kullanmak yerine P popülasyonunda üretilmiş olan çözümlerin ilgili k karar değişkeni için almış olduğu maksimum ve minimum değerler kullanılır. Nesil atlama işlemi denklem 2'de gösterilmiştir.

$$OP_{i,G}^k = Min_G^k + Max_G^k - P_{i,G}^k \quad (2)$$

$for i: \{1, \dots, NP\}; k: \{1, \dots, D\}$

Denklem 2'de, Min_G^k ve Max_G^k sırasıyla k . karar değişkeninin G jenerasyonu P popülasyonunda aldığı minimum ve maksimum değerleri belirtir. Karşıt popülasyon hesaplandıktan sonra karşıtlık temelli başlatma işleminde olduğu gibi P ve OP birleştirilir ve NP adet en iyi çözüm seçilir. ODE algoritmasının sözde kodu Algoritma 1'de gösterilmiştir. Yapılan çalışmada, ODE için seçilen parametreler şu şekildedir: NP : 20, J_r : 0.3. Bu parametreler belirlenirken NP için Awad vd. (2020)[19] tarafından gerçekleştirilen çalışma referans alınırken, J_r için Rahnamayan vd. (2008)[20]'nin yayınladığı çalışmada önerilen değer kullanılmıştır. Üretilen çözümlerin uygunluk değerlerinin belirlenmesi için de "F1 skoru" metriği kullanılmıştır.

Algoritma 1 şu şekilde özetlenebilir: (Satır 2); $[0 - 1]$ aralığındaki gerçek değerlerden oluşan NP adet çözüm vektörü ile başlangıç popülasyonu oluşturulur. (Satır 4-6); Başlangıç popülasyonundaki her bir çözüm için karşıt olan çözümler hesaplanır. (Satır 7); Başlangıç popülasyonu ve karşıt popülasyondaki tüm çözümlerin uygunluk değerleri hesaplanır ve en iyi NP adet çözüm başlangıç popülasyonu için seçilir. (Satır 12-

Algoritma 1: Karşıtlık Temelli Diferansiyel Gelişim Algoritması Sözde Kodu

```

1  $G \leftarrow 0$ 
2  $P_G \leftarrow$  Başlangıç popülasyonunu oluştur
3 /* Karşıtlık Temelli Popülasyon Başlatma */
4 for  $i = 0; i < NP; i++$  do
5   for  $k = 0; k < D; k++$  do
6      $OP_{i,G}^k = l^k + u^k - P_{i,G}^k$ 
7  $P_G \leftarrow \{P_G, OP_G\}$  kümesinden  $NP$  adet en iyi çözümü seç
8  $G \leftarrow G + 1$ 
9 /* Karşıtlık Temelli Popülasyon Başlatma */
10 while Sonlandırma kriteri gerçekleşene kadar devam et do
11   for  $P_{G-1}$  içerisindeki tüm modeller, model do
12     hedef = model.vektor
13     mutant = Mutasyon(hedef)
14     mutant = Çaprazlama(hedef, mutant, CR)
15     mutant.uygunluk  $\leftarrow$  Değerlendir(mutant)
16     if mutant.uygunluk < hedef.uygunluk then
17        $P_G \leftarrow$  mutant // Bir sonraki jenerasyona
18       bu çözümü ekle
19     else
20        $P_G \leftarrow$  hedef // Bir sonraki jenerasyona
21       bu çözümü ekle
22 /* Karşıtlık Temelli Jenerasyon Atlaması */
23 if  $rand(0, 1) < J_r$  then
24   for  $i = 0; i < NP; i++$  do
25     for  $k = 0; k < D; k++$  do
26        $OP_{i,G}^k = Min_G^k + Max_G^k - P_{i,G}^k$ 
27    $P_G \leftarrow \{P_G, OP_G\}$  kümelerinden  $NP$  adet en iyi
28   çözümü seç
29 /* Karşıtlık Temelli Jenerasyon Atlaması */
30  $G \leftarrow G + 1$ 

```

15); Başlangıç popülasyonundaki her bir hedef çözüm için $DE/rand/1/bin$ operatörü ile mutasyon ve çaprazlama işlemleri uygulanarak mutant çözümler üretilir. Bu çözümlerin uygunluk değerleri hesaplanır. (Satır 16-19); Hedef ve mutant çözümler uygunluk değerlerine göre karşılaştırılır ve uygunluk değeri daha iyi olan çözüm bir sonraki popülasyona aktarılır. (Satır 21-25); Belirli bir olasılıkla "Karşıtlık Temelli Jenerasyon Atlaması" işlemi gerçekleştirilir ve ilgili popülasyondaki her bir çözüm için karşıt çözümler üretilir, uygunluk değerleri hesaplanır. İlgili çözümler ve karşıtları arasından en iyi NP adet çözüm seçilerek bir sonraki jenerasyona aktarılır. ODE adımları 500

adet çözümün üretilip, ekran kartı üzerinde eğitilmesi sonucunda sonlandırılır.

III. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Veri Kümesi

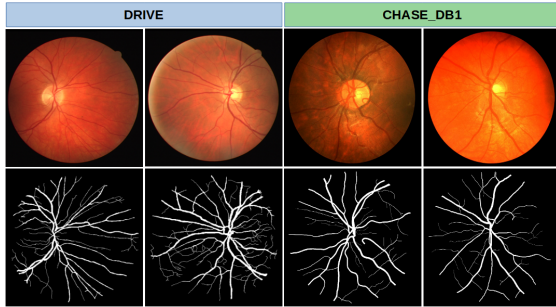
Yapılan çalışmada üretilen modellerin test edilmesi için herkese açık olarak paylaşılan iki farklı retinal kan damar segmentasyonu veri kümesi kullanılmıştır: DRIVE [21] ve CHASE_DB1 [22]. Her iki veri kümesine ait örnek görüntüler ve bunlara karşılık gelen gerçek referans görüntüleri Şekil 4'te gösterilmiştir.

3.1.1. DRIVE

565 × 584 boyutunda renkli görüntüler içeren retinal kan damar segmentasyonu veri kümesidir. Toplamda 40 adet retinal kan damar görüntüsü içeren bu veri kümesindeki görüntülerin 20 tanesi eğitim ve 20 tanesi test için kullanılmıştır. Her bir retina görüntüsüne ait gerçek referans görüntüsünün oluşturulması için iki farklı gözlemci kullanılmış ve yapılan çalışmada birinci gözlemci tarafından oluşturulan gerçek referans görüntüleri kullanılmıştır [6, 23].

3.1.2. CHASE DB1

28 adet renkli retina görüntüsünden oluşan bir veri kümesidir ve Carballal vd. (2018) [22] tarafından oluşturulmuştur. Bu görüntüler, 999 × 960 piksel çözünürlüğe sahiptir ve iki bağımsız uzman tarafından elle işaretlenmiştir. Yapılan çalışmada, ilk uzmanın işaretlemeleri gerçek referans görüntüsü olarak kabul edilmiştir. Eğitim için ilk 20 görüntü ve son sekiz görüntü ise test için kullanılmıştır [6, 23].



Şekil 4. DRIVE ve CHASE_DB1 veri kümeleri için örnek görüntüler. Üst satır; gerçek görüntüleri, alt satır; gerçek görüntülere karşılık gelen gerçek referans görüntülerini temsil etmektedir.

3.2. Geliştirme Detayları

Derin öğrenme ağlarının gerçek performansı, ağı tüm eğitim veri kümesi üzerinde uzun eğitim dönemleri boyunca eğitilmesi ve eğitime dahil edilmeyen test kümesi üzerinde test edilmesi sonucunda hesaplanır. Ancak SMA çalışmaları sırasında birçok aday sinir ağı üretilmekte ve bu sinir ağlarının hepsinin uzun eğitim dönemleri boyunca tüm eğitim veri kümesi ile eğitilmesi uygulanabilir değildir. Bu sorunu çözebilmek için literatürde, üretilen ağların seyretilmiş bir eğitim kümesi üzerinde daha az eğitim adımı ile

değerlendirilmesi fikri önerilmiştir [24]. Yapılan çalışmada eğitim ve değerlendirme adımları iki kısma ayrılmıştır: SMA dönemi ve SMA sonrası dönem.

SMA döneminde meta-sezgisel ile SMA işlemi sırasında üretilen ağların eğitilmesi ve değerlendirilmesi gerçekleştirilir. Yapılan çalışmada, SMA dönemi sırasında üretilen ağların eğitilmesi için tüm eğitim veri kümesinin yarısı kullanılır. Ağın kalitesinin değerlendirilmesi için ise eğitim veri kümesinin %10'u kullanılarak oluşturulan doğrulama kümesi kullanılır. Üretilen ağlar, maksimum 120 eğitim adımı boyunca eğitilir ve eğitim sırasında ağı en iyi doğrulama kaybı 10 adım boyunca iyileşmezse bu adımda eğitim sonlandırılır (Erken Durdurma). 500 adet çözümün ekran kartı üzerinde eğitilmesi sonucunda ise meta-sezgiselin çalıştırılması sonlandırılır SMA dönemi bitilir.

Meta-sezgisel ile yapılan SMA işlemi sonucunda (SMA sonrası dönem) en iyi kaliteye sahip 5 adet çözüm seçilir ve bu çözümler eğitim veri kümesinin tamamıyla 200 eğitim adımı boyunca eğitilir. Ardından bu çözümlerin gerçek performansı, eğitime hiç dahil edilmemiş olan test kümesi üzerinde değerlendirilir ve bu test kümesi üzerinde elde edilen sonuçlar raporlanır. Yapılan çalışmaları boyunca üretilen derin öğrenme ağlarının oluşturulması için Pytorch kütüphanesi kullanılmıştır. SMA sonrası dönem için eğitilen UNAS-Net ve MedUNAS ağları için ortak olarak seçilen hiper-parametreler şu şekildedir: Optimize edici: Adam, Kayıp fonksiyonu: Dice kaybı + Jaccard kaybı + ikili çapraz entropi kaybı [25], Öğrenme oranı: 1e-3 ve Yığın boyutu: 128.

3.3. Ön-işleme

Yapılan çalışmada kullanılan DRIVE ve CHASE_DB1 veri kümeleri az eğitim örneğine sahiptir. Bu durum üretilen modellerin eğitimi ve değerlendirilmesini zorlaştırmakta, veri kümesindeki kompleks yapıların ortaya çıkarılmasını mümkün kılmamaktadır. Bu nedenle, gerçekleştirilen çalışmada Wentao vd. (2022) [6] tarafından önerilen ön-işleme adımları uygulanmıştır. Seçilen veri kümelerindeki eğitim örneklerinin sayısını arttırmak amacıyla görüntüler 48 × 48 boyutunda yamalara bölünmüş ve aşırı-öğrenmeyi engellemek amacıyla şu veri çoğaltma işlemleri uygulanmıştır: Dikey ve yatay rastgele çevirme ve [90, 180, 270] derece görüntülerin döndürülmesi. Anlatılan ön-işleme adımları sadece eğitim örnekleri üzerinde uygulanmıştır. Eğitilen modelin gerçek performansının hesaplandığı test veri kümelerinde ise herhangi bir ön-işleme veya veri çoğaltma işlemi uygulanmamıştır. Adil bir değerlendirme gerçekleştirilmesi için test setindeki orijinal görüntüler kullanılmıştır.

3.4. Performans Ölçütleri

Önerilen yöntemlerin segmentasyon performansı doğruluk (ACC), duyarlılık (SEN), özgüllük (SPE), F1 puanı (F1) ve birleşimlerin kesişimi (IOU) kullanılarak değerlendirilmiştir [6]. Bu metrikler dört farklı terminoloji kullanılarak hesaplanmaktadır: Doğru Pozitif (TP): doğru şekilde damar olarak sınıflandırılan pikseller (pozitif örnekler); Doğru Negatif (TN): doğru şekilde damar yok olarak sınıflandırılan pikseller (negatif örnekler); Yanlış Pozitif (FP): yanlışlıkla damar olarak sınıflandırılan ancak damar olmayan pikselleri ifade eder; Yanlış Negatif (FN): yanlışlıkla damar olmayan olarak sınıflandırılan ancak gerçekte damar olan pikselleri ifade eder. Bu ölçütlerin her biri önerilen yöntemin segmentasyon performansını farklı şekillerde ölçmektedir ve ölçütlerin hesaplanması için kullanılan formüller Tablo 2'de gösterilmiştir. Doğruluğu hesaplamak için doğru şekilde damar/damar olmayan olarak sınıflandırılan piksel sayısı görüntüdeki toplam piksel sayısına bölünürken, özgüllüğü hesaplamak için doğru şekilde damar olmayan olarak sınıflandırılan piksel sayısı görüntüdeki toplam damar olmayan piksel sayısına bölünmektedir. Bu çalışmada, segmente edilmiş görüntüler oluşturmak için eşik değeri 0,5 olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. Performans Ölçütleri

Performans Ölçütü	Formül
ACC	$(TP + TN) / (TP + TN + FP + FN)$
SEN	$(TP) / (TP + FN)$
SPE	$(TN) / (TN + FP)$
F1	$(2TP) / (2TP + FP + FN)$
IOU	$(TP) / (TP + FP + FN)$

IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

UNAS-Net ve MedUNAS yöntemleri için elde edilen sonuçlar farklı SMA çalışmaları ile DRIVE ve CHASE_DB1 veri kümeleri üzerinde segmentasyon performansı (Doğruluk-ACC, Duyarlılık-SEN, Özgüllük-SEP, F1 skoru-F1, kesişim/birleşim-IOU) ve model karmaşıklığı açısından karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Ayrıca bu tabloda son zamanlarda literatürde önerilen SMA çalışmalarının (HNAS [13], Genetic U-Net [14],

BTU-Net [15] ve Popat vd. (2020) [26]) sonuçları da listelenmiştir. Adil bir kıyaslama yapılması amacıyla tabloda verilen çalışmalar tarafından raporlanan sonuçlar kullanılmıştır. Tablo 3'te verilen sonuçlar incelendiğinde UNAS-Net ve MedUNAS yöntemlerinin her iki veri kümesi için de en az parametreye (Genetic U-Net hariç) sahip ağları ürettiği görülmektedir. DRIVE veri kümesi için MedUNAS en iyi SEN değerini elde ederken ACC ve F1 değerleri açısından en iyi ikinci değerleri elde etmiştir. MedUNAS, Popat vd. (2020)'den 6,37, HNAS çalışmasından 2,28 ve BTU-Net çalışmasından 13,22 kat daha az parametreye sahip model ile ACC, SEN ve F1 değerleri açısından daha iyi performans göstermiştir. Benzer şekilde, UNAS-Net'de bu çalışmalardan sırasıyla 26,12, 9,35 ve 54,19 kat daha az parametreyle yine ACC, SEN ve F1 değerleri açısından daha iyi segmentasyon performansı göstermiştir. MedUNAS ve UNAS-Net çalışmaları kendi aralarında karşılaştırıldığında ise beklenildiği gibi UNAS-Net'in daha az parametreye sahip ağlar ürettiği görülmüş (MedUNAS iki iç-kenar kısıtı sebebiyle daha yüksek parametrelili ağlar üretmeye daha yatkın) ve yine de MedUNAS ile tüm ölçütler açısından yüksek rekabetçi sonuçlar elde ettiği gösterilmiştir. CHASE_DB1 veri kümesi için de benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir. UNAS-Net, MedUNAS'a göre 1,76 kat daha az parametreye sahip sinir ağı ile tüm ölçütler açısından rekabetçi sonuçlar elde etmiştir (Maksimum 0,26 puan fark).

UNAS-Net ve MedUNAS yöntemleri U-şekilli ağlar öneren son-teknoloji çalışmalar ile de karşılaştırılmıştır ve sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'te verilen sonuçlar doğru karşılaştırma yapılması için Wentao vd. (2022)[6] tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır (MedUNAS ve UNAS-Net hariç). Elde edilen sonuçlar incelendiğinde UNAS-Net ve MedUNAS yöntemlerinin DRIVE veri kümesi için en az parametreye sahip modelleri ürettiği görülmektedir. MedUNAS yönteminin ACC için en iyi ve F1 için en iyi ikinci sonucu elde ettiği görülmektedir ve diğer ölçütler için de 12,22 kata kadar daha az parametre ile yüksek rekabetçi sonuçlar elde edilmiştir. UNAS-Net yöntemi MedUNAS yönteminden 4,09 kat daha az parametreye sahip model üretmiş ancak performans ölçütleri açısından daha kötü sonuçlar vermiştir.

Tablo 3. SMA yöntemlerinin segmentasyon performansı ve karmaşıklık açısından karşılaştırılması. Kırmızı ve mavi renkler sırasıyla en iyi iki sonucu göstermektedir.

Yöntemler	Param (M)	DRIVE				
		ACC	SEN	SPE	F1	IOU
HNAS [13]	2,90	95,46	77,44	98,09	81,29	-
Genetic U-Net [14]	0,27	97,07	83,00	98,43	83,14	-
BTU-Net [15]	16,80	96,89	-	98,44	81,78	-
Popat vd. [26]	8,10	95,34	75,01	98,31	-	-
UNAS-Net [16]	0,31	97,02	82,00	98,42	81,80	69,23
MedUNAS [17]	1,27	97,06	83,41	98,36	82,18	69,77

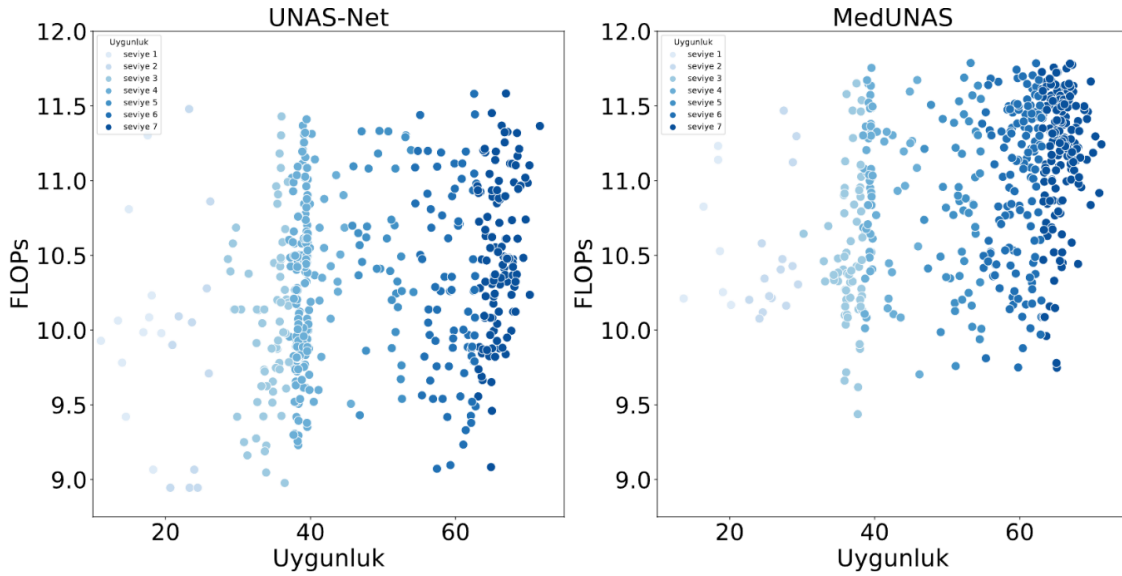
Yöntemler	Param (M)	CHASE_DB1				
		ACC	SEN	SPE	F1	IOU
Genetic U-Net [14]	0,27	97,69	84,63	98,57	82,23	-
BTU-Net [15]	16,80	97,87	-	98,64	81,09	-
UNAS-Net [16]	3,41	97,55	87,50	98,34	80,52	67,43
MedUNAS [17]	6,01	97,56	84,50	98,60	80,22	66,51

Tablo 4. Önerilen yöntemlerin son-teknoloji yöntemler ile segmentasyon performansı ve parametre sayısı açısından karşılaştırılması. Kırmızı ve mavi renkler sırasıyla en iyi iki sonucu göstermektedir.

Yöntemler	Yıl	Param (M)	DRIVE					CHASE_DB1				
			ACC	SEN	SPE	F1	IOU	ACC	SEN	SPE	F1	IOU
U-Net [3]	2015	7,76	96,78	80,57	98,33	81,41	68,64	97,43	76,50	98,84	78,98	65,26
U-Net++[27]	2018	9,05	96,79	78,91	98,50	81,14	68,27	97,39	83,57	98,32	80,15	66,88
Attention U-Net [28]	2018	8,73	96,62	79,06	98,31	80,39	67,21	97,30	83,84	98,20	79,64	66,17
CS-Net [29]	2019	8,40	96,32	81,70	98,54	80,39	70,17	97,42	84,00	98,32	80,42	67,25
AG-Net [30]	2019	-	96,92	81,00	98,48	-	69,65	97,43	81,86	98,48	-	66,69
RVSegNet [31]	2020	5,20	96,81	81,07	98,45	-	-	97,26	80,69	98,36	-	-
SCS-Net [32]	2021	-	96,97	82,89	98,38	-	-	97,44	83,65	98,39	-	-
SGL [5]	2021	15,53	97,05	83,80	98,34	83,16	-	97,71	86,90	98,43	82,71	-
FR-UNet [6]	2022	5,72	97,05	83,56	98,37	83,16	71,20	97,48	87,98	98,14	81,51	68,82
UNAS-Net[16]	2023	0,31-3,41	97,02	82,00	98,42	81,80	69,23	97,55	87,50	98,34	80,52	67,43
MedUNAS[17]	2023	1,27-6,01	97,06	83,41	98,36	82,18	69,77	97,56	84,50	98,60	80,22	66,51

CHASE_DB1 için elde edilen sonuçlara bakıldığında UNAS-Net yönteminin en az karmaşıklığa sahip sinir ağını ürettiği görülmektedir. MedUNAS, en az karmaşıklığa sahip üçüncü ağ ile ACC ve SPE ölçütleri açısından en iyi ikinci sonuçları elde etmiştir. UNAS-Net ise en az karmaşıklığa sahip ağ yapısı ile SEN ve IOU ölçütleri açısından en iyi ikinci sonuçları elde etmiştir. UNAS-Net ve MedUNAS yöntemleri karşılaştırıldığında ise UNAS-Net'in 1,76 kat daha parametre ile SEN, F1 ve IOU ölçütleri açısından MedUNAS'tan daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Diğer ölçütler açısından incelendiğinde her iki yöntemin de diğer çalışmalar ile rekabetçi sonuçlar elde ettiği görülmektedir. UNAS-Net ve MedUNAS yöntemleri U-şekilli ağlar temel alınarak

üretildiği için U-Net ile de karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında her iki veri kümesi için de UNAS-Net ve MedUNAS'ın daha az parametre sayısı ile tüm ölçütler açısından U-Net'ten daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. DRIVE veri kümesi için UNAS-Net 25 kat, MedUNAS ise 6,11 kat daha az parametre sayısı ile U-Net'ten tüm performans ölçütleri açısından daha iyi sonuçlar verirken, CHASE_DB1 için UNAS-Net 2,27, MedUNAS ise 1,29 kat daha az parametre ile tüm ölçütler açısından daha iyi sonuçlar vermiştir. Sonuç olarak UNAS-Net ve MedUNAS'ın hem segmentasyon performansı hem de model karmaşıklığı açısından temel alınan U-Net'i iyileştirdiği görülmüştür.



Şekil 5. UNAS-Net ve MedUNAS yöntemlerinin arama performansının model karmaşıklığı ve segmentasyon performansı açısından karşılaştırılması. Seviyenin yükselmesi üretilen çözümlerin kalitesinin arttığını göstermektedir.

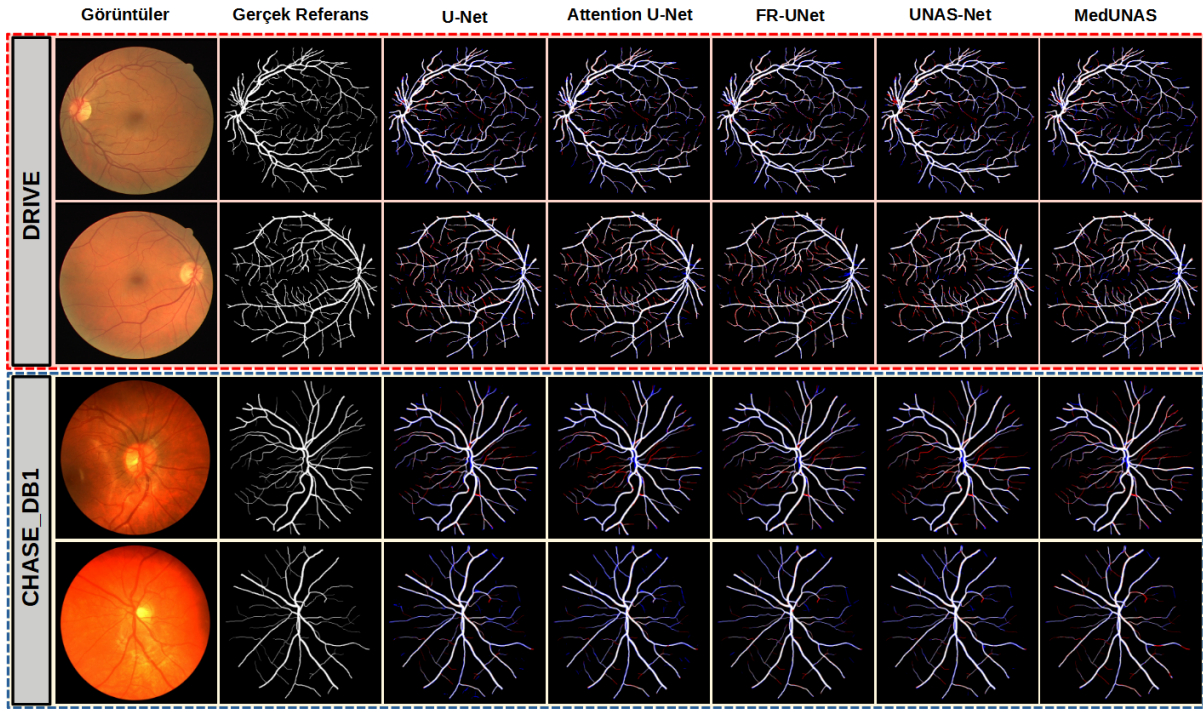
Önerilen yöntemler tarafından elde edilen sonuçlar görsel olarak da karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir. U-Net ve Attention U-Net modelleri kendi çalışmaları referans alınarak tekrar kodlanabildiği için ve FR-UNet çalışması da farklı veri kümeleri için eğitilmiş ağırlıkları hazır olarak sunduğu için karşılaştırmaya dahil edilmiştir. Şekil 6'da gösterilen yöntemler FP, FN ve TP açısından karşılaştırılmıştır. Bölüm 3.4'te belirtildiği gibi Doğru Pozitif (TP): doğru şekilde damar olarak sınıflandırılan pikseller (pozitif örnekler); Yanlış Pozitif (FP): yanlışlıkla damar olarak sınıflandırılan ancak damar olmayan pikselleri ifade eder; Yanlış Negatif (FN): yanlışlıkla damar olmayan olarak sınıflandırılan ancak gerçekte damar olan pikselleri ifade eder. Bu nedenle elde edilen görüntülerde, FP ve FN piksellerin sayısının mümkün olduğunca az olması beklenir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, DRIVE veri kümesi için tüm yöntemlerin birbirine benzer sonuçlar elde ettiği ancak FR-UNet, UNAS-Net ve MedUNAS yöntemlerinin daha az FP ve FN piksel içerdiği görülmektedir. Benzer sonuçlar CHASE_DB1 veri kümesi için de geçerlidir. FR-UNet ve önerilen yöntemler kıyaslandığında ise önerilen yöntemler daha fazla FN piksele sahipken, FR-UNet'in daha fazla FP piksele sahip olduğu görülmektedir.

UNAS-Net ve MedUNAS için arama yöntemi olarak kullanılan ODE'nin arama uzayındaki performansı iki farklı kodlama şeması üzerinden karşılaştırılmış ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Her iki yöntem de, üretilen çözümlerin uygunluk değerleri ve model karmaşıklığı (Kayan Noktalı Operasyonlar - Floating Point Operations - FLOPs) açısından karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalarda, üretilen modellerin karmaşıklığının karşılaştırılabilmesi için parametre

sayısı ve FLOPs gibi değerler sıklıkla kullanılmaktadır [20]. Şekil 5'te y ekseninde gösterilen değerler \log_{10} tabanında temsil edilmiş ve model karmaşıklığının bir de FLOPs açısından karşılaştırılması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, UNAS-Net yönteminin yüksek uygunluk değerine (F1 skoru) sahip çözümleri daha geniş bir FLOPs aralığında (y ekseninde 9-11,5 değerleri arası) yakalayabildiği görülmektedir. Bu durum, UNAS-Net'in yüksek kaliteli çözümleri daha az karmaşıklığa sahip modeller ile de yakalayabildiğini göstermektedir. MedUNAS yönteminde ise iyi çözümlerin genel olarak daha yüksek FLOPs değerlerine sahip alanlarda (y ekseninde 11-12 değerleri arası) yakalanabildiği görülmektedir.

V. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada, SMA için önerdiğimiz UNAS-Net ve MedUNAS yöntemlerinde kullanılan kodlama şemaları iki farklı retinal kan damar segmentasyonu veri kümesi üzerinde karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler, farklı SMA çalışmaları ve U-şekilli ağlar öneren son teknoloji çalışmalar ile parametre sayısı ve segmentasyon performansı açısından karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, UNAS-Net ve MedUNAS yöntemlerinin tüm veri kümeleri için en az parametreye (Genetic U-Net hariç) sahip ağları ürettiği görülmektedir. MedUNAS, BTU-Net'ten 13,22 kat daha az parametre ile ACC, SEN ve FI değerleri açısından daha iyi performans gösterirken, UNAS-Net 54,19 kat daha az parametreyle ACC, SEN ve FI değerleri açısından daha iyi segmentasyon performansı göstermiştir. Ayrıca, bu yöntemler U-şekilli son teknoloji çalışmalar ile de



Şekil 6. Farklı segmentasyon modelleri tarafından elde edilen görüntülerin görsel olarak karşılaştırılması.

Kırmızı renk yanlış segmente edilen negatif pikselleri (FN), mavi renk yanlış segmente edilen pozitif pikselleri (FP) ve beyaz renk ise doğru segmente edilen pikselleri (TP) temsil etmektedir.

karşılaştırılmış ve DRIVE veri kümesi için en az parametreye sahip modeller ile yüksek rekabetçi sonuçlar elde edilmiştir. CHASE_DB1 için UNAS-Net 1,76 kat daha az parametre ile *SEN*, *F1* ve *IOU* ölçütleri açısından MedUNAS'tan daha iyi sonuçlar vermiş diğer ölçütler açısından da her iki yöntemin de diğer çalışmalar ile rekabetçi sonuçlar elde ettiği görülmüştür. UNAS-Net ve MedUNAS yöntemleri temel alınan U-Net yöntemi ile de karşılaştırılmıştır. DRIVE veri kümesi için UNAS-Net 25, MedUNAS ise 6,11 kat daha az parametre sayısı ile temel alınan U-Net'ten tüm performans ölçütleri açısından daha iyi sonuçlar verirken, CHASE_DB1 için UNAS-Net 2,27, MedUNAS ise 1,29 kat daha az parametre ile tüm ölçütler açısından daha iyi sonuçlar vermiştir. Sonuç olarak UNAS-Net ve MedUNAS'ın hem segmentasyon performansı hem de model karmaşıklığı açısından temel alınan U-Net'i iyileştirdiği görülmüştür. Ayrıca, UNAS-Net için seçilen kodlama şeması ile MedUNAS'a kıyasla daha az karmaşık modeller ile yüksek rekabetçi sonuçlar elde edilebildiği gösterilmiştir. Önerilen yöntemler kalın damarların segmentasyonu için başarılı sonuçlar verse de ince damarlar için aynı başarıyı elde edememektedir. Gelecek çalışmalarda, gerçek referans görüntüsündeki ince ve kalın damarların ayrıştırılması ve bu görüntüler ile iki farklı derin sinir ağı mimarisinin ayrı ayrı eğitilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca, Karşıtlık Temelli Diferansiyel Gelişim Algoritmasının başarısı seçilen parametreler ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle bu algoritma üzerinde parametre optimizasyonu gerçekleştirilebilir. Benzer şekilde, öğrenme oranı, kayıp fonksiyonu ve yığın

boyutu gibi parametreler için de parametre ayarlama işlemi gerçekleştirilebilir. Önerilen yöntemler, 3B damar segmentasyonu için test edilebilir ve farklı medikal görüntü segmentasyonu problemleri üzerinde değerlendirilebilir. Son olarak, segmente edilen görüntü üzerinde genişletme ve daraltma gibi işlemler uygulanarak son-işlemenin sonuca olan etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Abràmoff, M. D., Garvin, M. K., & Sonka, M. (2010). Retinal imaging and image analysis. *IEEE reviews in biomedical engineering*, 3, 169-208.
- [2] Wang, B., Qiu, S., He, H. (2019). Dual Encoding U-Net for Retinal Vessel Segmentation. In: Shen, D., et al. *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI 2019*. MICCAI 2019. Lecture Notes in Computer Science(), vol 11764. Springer, Cham.
- [3] Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In: Navab, N., Hornegger, J., Wells, W., Frangi, A. (eds) *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*. MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science(), vol 9351. Springer, Cham.
- [4] Chen, C., Chuah, J. H., Ali, R., & Wang, Y. (2021). Retinal vessel segmentation using deep learning: a review. *IEEE Access*, 9, 111985-112004.

- [5] Zhou, Y., Yu, H., & Shi, H. (2021). Study group learning: Improving retinal vessel segmentation trained with noisy labels. In *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention–MICCAI 2021: 24th International Conference, Strasbourg, France, September 27–October 1, 2021, Proceedings, Part I 24* (pp. 57-67). Springer International Publishing.
- [6] Liu, W., Yang, H., Tian, T., Cao, Z., Pan, X., Xu, W., ... & Gao, F. (2022). Full-resolution network and dual-threshold iteration for retinal vessel and coronary angiograph segmentation. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 26(9), 4623-4634.
- [7] Rong, Y., Xiong, Y., Li, C., Chen, Y., Wei, P., Wei, C., & Fan, Z. (2023). Segmentation of retinal vessels in fundus images based on U-Net with self-calibrated convolutions and spatial attention modules. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 1-11.
- [8] Baker, B., Gupta, O., Naik, N., & Raskar, R. (2016). Designing neural network architectures using reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:1611.02167*.
- [9] Zoph, B., & Le, Q. V. (2016). Neural architecture search with reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:1611.01578*.
- [10] Grathwohl, W., Creager, E., Ghasemipour, S. K. S., & Zemel, R. (2018). Gradient-based optimization of neural network architecture.
- [11] Liu, H., Simonyan, K., & Yang, Y. (2018). Darts: Differentiable architecture search. *arXiv preprint arXiv:1806.09055*.
- [12] Liu, X., Song, L., Liu, S., & Zhang, Y. (2021). A review of deep-learning-based medical image segmentation methods. *Sustainability*, 13(3), 1224.
- [13] Houreh, Y., Mahdinejad, M., Naredo, E., Dias, D. M., & Ryan, C. (2021). HNAS: Hyper Neural Architecture Search for Image Segmentation. In *ICAART (2)* (pp. 246-256).
- [14] Wei, J., Zhu, G., Fan, Z., Liu, J., Rong, Y., Mo, J., ... & Chen, X. (2021). Genetic U-Net: automatically designed deep networks for retinal vessel segmentation using a genetic algorithm. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 41(2), 292-307.
- [15] Rajesh, C., Sadam, R., & Kumar, S. (2023). An evolutionary U-shaped network for Retinal Vessel Segmentation using Binary Teaching–Learning–Based Optimization. *Biomedical Signal Processing and Control*, 83, 104669.
- [16] Kuş, Z., Aydın, M., Kiraz, B., & Can, B. (2022). Neural Architecture Search Using Metaheuristics for Automated Cell Segmentation. In *Metaheuristics International Conference* (pp. 158-171). Cham: Springer International Publishing.
- [17] Kuş, Z., Kiraz, B. (2023). Evolutionary Architecture Optimization for Retinal Vessel Segmentation. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*.
- [18] Dong, J., Hou, B., Feng, L., Tang, H., Tan, K. C., & Ong, Y. S. (2022). A cell-based fast memetic algorithm for automated convolutional neural architecture design. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*.
- [19] Awad, N., Mallik, N., & Hutter, F. (2020). Differential evolution for neural architecture search. *arXiv preprint arXiv:2012.06400*.
- [20] Rahnamayan, S., Tizhoosh, H. R., & Salama, M. M. (2008). Opposition-based differential evolution. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 12(1), 64-79.
- [21] Staal, J., Abramoff, M. D., Niemeijer, M., Viergever, M. A., & Van Ginneken, B. (2004). Ridge-based vessel segmentation in color images of the retina. *IEEE transactions on medical imaging*, 23(4), 501-509.
- [22] Carballal, A., Novoa, F. J., Fernandez-Lozano, C., García-Guimaraes, M., Aldama-López, G., Calviño-Santos, R., ... & Pazos, A. (2018). Automatic multiscale vascular image segmentation algorithm for coronary angiography. *Biomedical Signal Processing and Control*, 46, 1-9.
- [23] Li, J., Gao, G., Liu, Y., & Yang, L. (2023). MAGF-Net: A multiscale attention-guided fusion network for retinal vessel segmentation. *Measurement*, 206, 112316.
- [24] Xie, X., Song, X., Lv, Z., Yen, G. G., Ding, W., & Sun, Y. (2023). Efficient evaluation methods for neural architecture search: A survey. *arXiv preprint arXiv:2301.05919*.
- [25] Kuş, Z., Kiraz, B., Göksu, T. K., Aydın, M., Özkan, E., Vural, A., Kiraz, A., & Can, B. (2023). Differential evolution-based neural architecture search for brain vessel segmentation. In *Engineering Science and Technology, an International Journal* (Vol. 46, p. 101502).
- [26] Papat, V., Mahdinejad, M., Cedeño, O. D., Naredo, E., & Ryan, C. (2020). GA-based U-Net Architecture Optimization Applied to Retina Blood Vessel Segmentation. In *IJCCI* (pp. 192-199).
- [27] Zhou, Z., Rahman Siddiquee, M. M., Tajbakhsh, N., & Liang, J. (2018). Unet++: A nested u-net architecture for medical image segmentation. In *Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support: 4th International Workshop, DLMIA*

- 2018, and 8th International Workshop, ML-CDS 2018, Held in Conjunction with MICCAI 2018, Granada, Spain, September 20, 2018, Proceedings 4 (pp. 3-11). Springer International Publishing.
- [28] Oktay, O., Schlemper, J., Folgoc, L. L., Lee, M., Heinrich, M., Misawa, K., ... & Rueckert, D. (2018). Attention u-net: Learning where to look for the pancreas. *arXiv 2018*. arXiv preprint arXiv:1804.03999.
- [29] Mou, L., Zhao, Y., Chen, L., Cheng, J., Gu, Z., Hao, H., ... & Liu, J. (2019). CS-Net: Channel and spatial attention network for curvilinear structure segmentation. In *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention–MICCAI 2019: 22nd International Conference, Shenzhen, China, October 13–17, 2019, Proceedings, Part I 22* (pp. 721-730). Springer International Publishing.
- [30] Zhang, S., Fu, H., Yan, Y., Zhang, Y., Wu, Q., Yang, M., ... & Xu, Y. (2019). Attention guided network for retinal image segmentation. In *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention–MICCAI 2019: 22nd International Conference, Shenzhen, China, October 13–17, 2019, Proceedings, Part I 22* (pp. 797-805). Springer International Publishing.
- [31] Wang, W., Zhong, J., Wu, H., Wen, Z., & Qin, J. (2020). Rvseg-net: An efficient feature pyramid cascade network for retinal vessel segmentation. In *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention–MICCAI 2020: 23rd International Conference, Lima, Peru, October 4–8, 2020, Proceedings, Part V 23* (pp. 796-805). Springer International Publishing.
- [32] Wu, H., Wang, W., Zhong, J., Lei, B., Wen, Z., & Qin, J. (2021). Scs-net: A scale and context sensitive network for retinal vessel segmentation. *Medical Image Analysis*, 70, 102025.

İki Aşamalı Risk Değerlendirme Yöntemi ile Havacılık Sektöründe Uygulama

A Two-Stage Risk Assessment Method in Aviation Sector

Beyzanur ÇAYIR ERVURAL¹ 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Yönetimi Bölümü Konya, Türkiye

Öz

Globalleşen dünyada havacılık sektörü en önemli ulaştırma alanlarından biri olup, iyileştirilip geliştirilmesi için pek çok çalışma yapılmaktadır. Havaalanları yolcu trafiğinin ve yük taşımacılığının çok sıkı takip edildiği, ufak bir aksaklığın sektöre maliyetinin ciddi seviyede olacağı stratejik bölgelerdir. Bu çalışmada havaalanlarında meydana gelen hata ve risk türleri belirlenerek önleyici bakım planlama faaliyetlerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu açıdan hata türü etkileri analizi (HTEA) yaklaşımı kullanarak havalimanı yetkilileri ile görüşülerek alınan bilgiler doğrultusunda en önemli hata türleri, risk öncelik sayısı (RÖS) ölçeği ile belirlenmiştir. Buna göre ilgili hata türlerinin önlenmesi için önleyici faaliyetler sıralanmıştır. Ayrıca HTEA yönteminin eksikliğini gidermek için objektif bir yöntem olan Entropi yaklaşımına dayanan karar verme yöntemi ile ağırlıklandırılarak hata türleri sınıflandırılmıştır. Buna göre hava alanlarında ortaya çıkan tehlike ve risk durumları iki aşamalı bir analitik yaklaşımla çok boyutlu bir açıdan değerlendirilmektedir. Elde edilen sonuçların, hava alanı yöneticilerinin öncelikle yapması gereken iyileştirme ve yatırım kararları hakkında yol gösterici olması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Hata Türü Etkileri Analizi (HTEA), Entropi, Havacılık Sektörü, Risk Değerlendirme

Abstract

In the globalizing world, the aviation sector is one of the most important transportation areas and many studies are being carried out to improve and develop it. Airports are strategic areas where passenger traffic and freight transport are closely monitored, and a small disruption will lead to a serious cost for the entire sector. In this study, we aim to develop preventive maintenance planning activities by identifying different failure types and risks that occur at airports. In this direction, by using the failure mode effects analysis (FMEA) approach, the most important failure types were determined with the risk priority number (RPN) scale in line with the information obtained by interviewing the airport authorities. Accordingly, preventive actions are listed to prevent the related fault types. In addition, in order to eliminate the deficiency of the FMEA method, the failure modes were classified by weighting the failure modes with the decision-making method based on the Entropy approach, which is an objective method. In this direction, the hazard and risk situations arising at airports are evaluated from a multidimensional perspective with a two-stage analytical approach. It is expected that the results obtained will be a guide for the improvement and investment decisions that airport managers should take first.

Keyword: Failure mode effect analysis (FMEA), Entropy, Aviation sector, Risk evaluation

I. GİRİŞ

Rekabet koşullarının giderek ağırlaştığı günümüz piyasa şartlarında işletmelerin pazarda kalabilmeleri rekabet avantajı ile yani müşteri memnuniyeti ile mümkündür [1]. Ürün güvenilirliğinin sağlanmadığı işletmelerde kalite yakalanamayacağı için müşteri memnuniyetinin sağlanması mümkün değildir. Dolayısıyla ürün ve süreç hatasının en aza indirgenerek tehlikelerin belirlenmesinde risk analizi ile pazarda sürdürülebilirliğin sağlanmasına ihtiyaç vardır [2]. Risk analizi, mevcut süreç ve sistem yapısı incelenerek işletmelerde ortaya çıkacak tehlikeli durumların belirlenmesi ve bu tehlikelerin riske dönüşme derecesi değerlendirilerek gerekli tedbir ve önlemlerin alınması için yapılmaktadır [3].

Kapsamlı ve sistematik yaklaşımlarla uygulanan bir risk analizi yöntemi olan hata türü etkileri analizi (HTEA) ürün, tasarım, süreç, yöntem ve hizmet gibi durumlarda potansiyel hata türlerinin belirlenmesi ve olasılık, şiddet ve saptanabilirlik (tespit edilebilirlik) derecelerine göre risk öncelik sayısı (RÖS) belirlenerek kritiklik derecesi tespit edilmekte ve böylece hata türlerinin sınıflandırılması amacıyla kullanılmaktadır [4].

RÖS değeri incelenerek kritik hata türü etkisinin azaltılması için, olasılığının düşürülmesi ya da tespit edilebilirlik derecesini artırılması için önlemler alınmaktadır. Bu önlemlerden sonra yeniden RÖS değeri hesaplanarak sistemdeki iyileşme gözlenmektedir. Bu sayede sorunlar ortaya çıkmadan önce düzeltici önlemler alınabilmektedir. Bu şekilde müşteri şikâyetleri azaltılarak müşteri memnuniyetinin sağlanması ve kalitede sürdürülebilirlik amaçlanmaktadır.

İşletmelerin sürekli değişen müşteri isteklerine sağlıklı biçimde cevap vermeleri verimlilikle yürütülen üretim süreçleri ve doğru tasarlanmış tedarik zinciri ağ yönetimi ile mümkündür. Bu sebeple üretim süreçlerinin yalın üretim teknikleriyle değerlendirilmesi bu sayede boşa geçen sürenin düşürülmesi, üretim süresinin kısaltılması, üretimdeki atıl kapasite kullanım oranının ve ıskarta/fire miktarının azaltılması, üretimdeki kayıpların önlenmesi şeklinde tüm maliyeti artıran unsurların değerlendirilmesi gerekmektedir[5].

Günümüz piyasa koşullarında tüm işletmeler üretim süreçlerine devam etmektedir. Önemli olan husus en kısa sürede, yüksek verimlilikle ve istenilen kalitede müşteri beklentilerine yanıt verebilmektir. İşletmeler yüksek verimlilik ve düşük maliyet politikası çerçevesinde müşteri isteklerini değerlendirirken, hataları önlemek için çeşitli kalite iyileştirme stratejileri geliştirmektedirler. Bu sayede HTEA ortaya çıkabilecek potansiyel hataları doğru tespit ederek önleyici olma niteliğine sahip olmakla birlikte önemli bir kullanım alanına sahiptir ve etkin problem çözme tekniği olarak işletmelerde kullanılmaktadır. Yöntem sayesinde önemli olarak değerlendirilen hata ve risk faktörleri objektif yaklaşımlarla hesaplanmakta önleyici faaliyetlerle düşük risk seviyesine kavuşturulmaktadır.

Bu çalışmada havacılık sektöründe karar verme yöntemine dayalı bir HTEA uygulaması gerçekleştirilmiştir. Literatürde özellikle imalat sektörü ve hizmet sektöründe yaygın kullanımı olan HTEA'nın havacılık sektörü gibi stratejik önemdeki bir alanda çalışma sayısının oldukça kısıtlı olduğu gözlenmiştir. İki aşamalı olarak en riskli iş faaliyetleri HTEA ile belirlenmiş ardından Entropi yöntemiyle en önemli olan iş çeşitleri tespit edilerek önem dereceleri atanmıştır. Öncelikli olan risk unsurlarına yönelik olarak yatırım ve iyileştirme faaliyetleri sağlanmıştır. Bu sayede en tehlikeli/riskli, önceliğe sahip unsurlar sınıflandırılmış önem seviyeleri de tespit edilerek kritik iş kollarında hata türleri değerlendirilmiş ve etki seviyesi düşürülmüştür. Bu sayede işletme için büyük karlılık sağlanmış ve sonradan iyileşme-düzeltilme yerine en kritik unsurlar için önleyici tedbirler alınarak sürdürülebilir karar mekanizması geliştirilmiştir. Havacılık sektöründe yapılan çalışmaların kısıtlı olduğu ve bu alana halen ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu çalışmada önerildiği gibi entropi tabanlı

ağırlıklandırma yaklaşımıyla, havalimanlarında ortaya çıkan hata türleri çevresel, teknolojik ve donanımsal sınıflandırma altında objektif bir karar verme yaklaşımıyla değerlendirilmesi açısından literatüre katkı sunması beklenmektedir.

Ayrıca çalışmanın uygulama konusu, alınan verilerin içeriği ve gerçek hayat problemini değerlendirmesi açısından da bu konuda çalışan araştırmacılara katkı sunması beklenmektedir. Bu çalışmada ikinci kısımda literatür araştırılmış ardından üçüncü ve dördüncü bölümde ele alınan metotlar açıklanmıştır. Beşinci bölümde uygulama yapılarak elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Altıncı bölümde uygulama sonuçları ve tartışma kısmı verilmiştir. Sonuç ve öneriler son bölüm olan yedinci kısımda sunulmuştur.

II. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

HTEA, 1940'lı yılların sonunda Amerikan ordusu tarafından geliştirilmiş ardından NASA tarafından yürütülen uzay programında kullanılmıştır. 1970'lerde Ford Motor Şirketi, tasarım süreçlerinde HTEA'yı uygulamıştır. 1993 yılında AIAG (Otomotiv Endüstrisi Eylem Grubu) tarafından HTEA analizi otomotiv üretimi ve tedarikçileri için gerçekleştirilmiştir. Geleneksel tehlike/risk analizi uygulamalarında kullanılan farklı teknikler vardır. Bunlar tehlike ve işletilebilirlik (HAZOP), hata ağacı analizi (FTA), olay ağacı analizi (ETA) ve hata türü etkileri analizi (HTEA)'dır [6], [7].

Literatür araştırmalarına bakıldığında HTEA'nın farklı uygulamaları olduğu görülmektedir. Kullanım alanı itibarıyla, havacılık ve savunma sanayi, üretim/imalat sektörü, iş sağlığı ve güvenliği, tedarik zinciri ve lojistik, elektronik, tıp, bilgisayar bilimi, üretim, kimya ve otomotiv endüstrisi gibi pek çok uygulama alanında etkin biçimde yararlanılmaktadır [13-20].

Literatür araştırmalarından görüleceği gibi çalışmaların büyük kısmı klasik HTEA yöntemini ele alırken diğerleri yöntemin kısıtlarından (sübjektif yapısı ve belirsizlik) dolayı modifiye edilmiş HTEA yöntemini ve bulanık HTEA modelini kullanmaktadır. Klasik HTEA'yı kullanan çalışmalara örnek olarak Salah vd. [14, 21] verilebilir. Ayrıca, Fabis-Domagala vd. [22], Shafiee ve Dinmohammadi [23], Nguyen vd. [24] klasik HTEA'yı geliştirerek şiddet ve sıklık faktörlerini alt faktörlere göre değerlendirmiştir. Bu önerilen modellerde, geleneksel HTEA'ya göre birçok avantaja sahiptir ve karar vericilere ve araştırmaya ve geliştirme departmanlarına ürün güvenilirliğini artırmada yardımcı olmaktadır. Göktaş [25] kalite geliştirme metotlarından biri olan HTEA kullanarak şirketlerin karbon envanteri oluşturmaya yardımcı olarak, havalimanının karbon akreditasyon sürecinde inceleme yapmıştır. HTEA yöntemine dayanarak iyileştirme önerileri sunulmuştur. Omairey vd.[26], uçağın ağırlığının ne kadar fazla olması yakıt ihtiyacının o kadar fazla olması anlamına geldiğini açıklayıp yakıt tüketiminin artmasıyla karbon emisyon

salınıminin artması araştırılmıştır. HTEA kullanılarak çok işlevli gövde göstericisinin verimliliği için alet sistemlerinin geliştirilmesi sunulmuştur. Elahi [27], çalışmada risk analizi için tehlikelerin tanımlanmasında çeşitli araçlar kullanmıştır. En yaygın araçlardan ikisi Hata Ağacı Analizi (FTA) ve HTEA'dır. Bu bölümde üç tip HTEA ele alınmaktadır: DFMEA, PFMEA ve UFMFA'dır. Ayrıca, Zihin Haritası Analizi ve P-Diyagramı gibi diğer iki araç da sunulmuştur. Ceylan vd. [28], çalışmada karmaşık mühendislik sistemleri için sistem teorik kaza modeli ve süreçler (STAMP), HTEA ve AHP yöntemlerine dayanan hibrit bir kaza analizi çerçevesi önermiştir. Önerilen model kapsamında, ilk olarak, güvenli kısıtlamaları tanımlanarak, hiyerarşik bir kontrol süreci oluşturulmuş ve güvenli olmayan faaliyetler arasındaki bağlantılar belirlenerek bir kaza niteliksel olarak analiz edilmiştir. İkinci adım olarak, hata modları, bunların nedenleri ve sonuçları belirlenmiştir. Son olarak, elde edilen uzman görüşlerinin analizi ile her bir hata modunun risk puanları hesaplanmıştır. Bu adımda, geleneksel HTEA'dan farklı olarak, sonuçlar her bir kaza faktörünün AHP yaklaşımına göre bulunan ağırlık puanlarına göre hesaplanır. Salah vd. [29], çalışmada HTEA metodunu yoğurt doldurma makinesinde geleneksel bileşenler ve endüstri 4.0 bileşenleri için RÖS değerleri açısından karşılaştırmış ve RÖS faktörlerine ilaveten bağımlılık faktörünü de değerlendirmeye katmıştır. Pareto analizi ile riskler önceliklendirilmiştir. Sonuçlara göre endüstri 4.0 bileşenlerinden yakınlık sensörü ve renk algılama sensörünün en büyük önceliğe sahip olduğu görülmektedir. Kusumasari vd. [30], bir öğenin arızalanmasının sistem çalışması üzerindeki sonuçlarını veya etkilerini belirlemek ve her bir potansiyel arızayı ciddiyetine göre sınıflandırmak için HTEA yaklaşımını kullanarak Google Haritalar kullanımının güvenlik etkisini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Sonunda, HTEA, en yüksek risk seviyesine karşı öngörülen eylemleri, hafifletmeleri ve stratejileri önceliklendirmek için şiddet, olasılık ve tespitin ürünü olarak RÖS değeri belirleyerek Google Haritalar'ın güvenlik yönlerini de analiz edebilecektir. Mendes vd. [31], havacılık sektöründe riskleri azaltmak için kullanılan proaktif, interaktif ve öngörücü önlemlerle birleştirilmiş yöntemler de dahil olmak üzere risk yönetimi teknolojik gelişmelerine ilişkin sistematik bir literatür taraması sunmaktadır. Tahmine dayalı ve etkileşimli yöntemler hataya toleranslı sistemler yaratabilir, kazaları önleyebilir ve sisteme geri bildirim sağlayarak kalite ve emniyet sistemlerini iyileştirebilir. Sistematik literatür taramasının bulguları, mevcut risk araçlarının ve modellerinin reaktif olduğunu, ancak proaktif, etkileşimli ve öngörücü analiz yöntemlerini incelemek için son zamanlarda önemli bir çaba olduğunu göstermektedir. Havacılık sektöründe riskin daha öngörülü bir şekilde azaltılması için geliştirilmiş veri analizi araçlarını veya yapay zeka kullanarak geliştirme fırsatları bulunmaktadır. Andre Filz vd. [13], endüstriyel yatırım

mallarının kullanım aşamasına ait geçmiş ve operasyonel veriler üzerinden derin öğrenme modellerini kullanarak, veriye dayalı bir HTEA metodolojisi sunmuştur. Geliştirilen metodolojinin, şeffaflığı artıracak bir karar destek sistemi ile endüstriyel yatırım mallarına yönelik bakım planlamasını desteklemesi beklenmektedir. Bu nedenle, üretim ekipmanı veya uçaklar gibi endüstriyel yatırım mallarına yönelik bakım planlamasını geliştirmeye yönelik veri tabanlı bir HTEA çerçevesinde geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. Ayrıca bu çerçevenin, bakım faaliyetlerinde ekonomik ve çevresel iyileştirme sağlamak amacıyla belirli arıza olasılıklarına ilişkin belirsizlikleri azaltarak bakım planlamasının doğruluğunu artırması amaçlanmaktadır.

Çalışmalar incelendiğinde diğer büyük bir kısmında problem karmaşıklığı ve büyük boyutlu olması nedeniyle çok kriterli karar verme yaklaşımlarından destek alındığı görülmüştür. Buna göre diğer karar verme teknikleriyle entegre edilmiş HTEA çalışmalarının bazıları şu şekildedir. Chang [32], yüksek teknoloji endüstrisinde bilgisayarın fiziksel donanımı destekleyecek şekilde ürün tasarımı için açıklanabilen ve açıklanamayan kriterleri birlikte değerlendirme imkanı sağlayan TOPSIS ve HTEA yöntemlerini birleştirerek, eksik bilgi altında cihaz tasarımında iyileşme amaçlamıştır. Liu vd. [33], QFD ve tasarım HTEA yöntemlerini birleştirerek yarı bitmiş ürünlerden LCD modüllerinde iyileştirme yapmayı amaçlamışlardır. Buna göre müşterilerden gelen kalite problemi kaynaklı şikâyetler düşürülmüştür. Hajiagha vd. [34], toplu ulaştırma sisteminde bekleme süresinden kaynaklanan aksaklığı gidermek için bulanık HTEA yöntemini bulanık inanç yapısını VIKOR yöntemiyle bileştirmiştir. Elde edilen sonuçlar insan kaynaklı nedenler, taşıma sistemi ve hat kaynaklı problemlerin gecikmelerde önemli rol oynadığını göstermiştir. Ahmadi vd. [35] karayolu inşaat proje risk değerlendirme çalışması için bulanık HTEA ve bulanık AHP yöntemlerini birlikte kullanmıştır. Romdhane vd. [36] HTEA ve AHP yöntemlerini kullanarak sistem yeterliliğinin kalite kontrol süreciyle değerlendirilmesi için küçük ve orta ölçekli işletmeler için 6 Sigma uygulamasını gerçekleştirmiştir. Fattahi ve Khalilzadeh [37], risk derece ağırlığı için bulanık AHP, MULTIMOORA ve bulanık çok amaçlı optimizasyon yöntemleriyle HTEA için yeni hibrit bir model geliştirmişlerdir. Her bir hata türü ağırlığı zaman, maliyet ve kar kriterlerine göre hesaplanmıştır. Nie vd. [38] atık su sistemlerine yönelik risk değerlendirmede HTEA uygulaması yapmışlardır ve hata türü risk derecelerinin belirlenmesinde BWM ve en büyük türetme yöntemini kullanıp COPRAS yöntemi ile sıralama yapmışlardır. Çok parçalı dilsel dağıtım değerlendirme yöntemiyle hesaplamalar yapılmıştır. Cano-Olivos vd. [39], AHP ve HTEA yöntemlerini birleştirerek satın alma departmanı faaliyetlerini değerlendiren bir risk analizi yapmışlardır. Bu entegre analiz yaklaşımı, tedarik zincirinin aksama süresini ve

mali açıdan etkisine neden olan potansiyel risklerin önceliklendirilmesini sağlamıştır. Uslu [40], savunma ve havacılık sanayisine yönelik araştırmalar yapıp ve bu alanda yapılan proses ve mevcut hataların tespitinin üzerinde durulmuştur. Çalışmada yeni ve geliştirilmiş bir HTEA ve çok kriterli karar verme tekniklerinin kullanılmasının yararlı olacağı öne sürülmüştür. Liu vd. [41] gaz istasyonunda gaz tedariki ve güvenlik riski süreçlerini olasılık ve küme teorisine dayanan yeni bir HTEA yaklaşımı önermişlerdir. Burada risk unsurlarını objektif biçimde değerlendirmek için Entropi yöntemiyle ağırlıklar hesaplanmıştır. Chiu vd. [42] ürün hizmet kontrol sürecinde HTEA ve önem performans analizini dahil etmişlerdir. Ayrıca gri ilişkisel analiz yöntemi ile alternatif hizmet noktaları değerlendirilmiştir.

Ayrıca belirsizliğin artması durumlarında da bulanık yaklaşımlardan yararlanılmıştır. Buna göre bulanık HTEA ve/veya ANFIS ve bulanık ÇKKV yöntemleriyle risk analizi ve hata araştırma çalışmaları yapılmıştır. Örneğin, Kumar vd. [43] LPG gaz tedariki istasyonunda hata türü derecelendirmesinde bulanık HTEA ve bulanık gri ilişki analizi yöntemlerini adapte etmişlerdir. Arabsheybani vd. [44], tedarik zinciri süreç yönetimi faaliyetleri kapsamında, ilgili tedarikçi performanslarının belirlenmesinde FMOORA'ya dayalı bulanık çok amaçlı optimizasyon modeli ile HTEA yaklaşımı geliştirmişlerdir. Tedarikçiler doğal afet veya politik değişkenlik gibi risklerle karşı karşıyadır. Tedarikçi risklerinin değerlendirilmesinde önerilen HTEA yaklaşımının başarılı sonuçlar sağladığı görülmüştür. Chen vd. [45], Choquet integraline ve sıralı ağırlıklı geometrik ortalama yöntemlerine dayalı bulanık HTEA yaklaşımıyla risk analiz değerlendirmesi yapmışlardır. Liu vd. [46] çalışmalarında sistemlerin, ürünlerin, süreçlerin ve hizmetlerin güvenilirliğini ve güvenliğini artırmak için çeşitli endüstrilerde uygulanan bulut model teorisine ve gri ilişki analizi yaklaşımına dayanan yeni bir HTEA yaklaşımı geliştirmiştir. Mentis [47], Aliğa Gemi Geri Dönüşüm Tesislerinde hem gemide hem de sahada gerçekleştirilen operasyonlarda ortaya çıkan risklerin analizi için HTEA, OWGA, FVIKOR ve dayanıklılık mühendisliği (RE) ilkelerini entegre eden yeni bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır. HTEA gibi geleneksel risk analizi yöntemleri, hata modlarını ve bunların sonuçlarını belirlemede etkili olmakla birlikte, özellikle insan ve organizasyon faktörlerinin önemli bir rol oynadığı karmaşık sistemlerde risklerin dinamik ve birbirine bağlı doğasını göz ardı edebilir. Bu makale, yeni bir proaktif risk analizi geliştirmek için hem klasik risk analizi yöntemlerinin güçlü yanları kullanmakta hem de RE ilkelerini kullanarak kapsamlı bir yaklaşım sunmaktadır. Proaktif ve yenilikçi yönleriyle bu yöntem, gemi geri dönüşüm endüstrisinde emniyet ve güvenilirlik standartlarında önemli gelişmeler vaat etmektedir. Goksu ve Arslan [48], çalışmada gemi operasyonları sırasında oluşabilecek potansiyel riskleri değerlendirmek için bulanık HTEA metodolojisine dayalı niceliksel bir deniz güvenliği analizi önermiştir.

Önerilen yaklaşımın uygulamasını pratikte göstermek amacıyla, gemi yanaşma/çıkarma operasyonlarında arıza modları belirlenmekte ve risk değerlerine göre önceliklendirilmektedir. Sonuçlara göre risk oranı daha yüksek olan arıza modları yorgunluk/bireysel hata, çok kuvvetli rüzgâr, aşırı sıcaklık, gelgit, gemi hızının artması/azalması olarak belirlenmiştir. Son olarak geminin emniyetini etkileyen arıza türlerinin de kontrol altına alınması ve bu arızaların etkilerinin proaktif bir yaklaşımla azaltılması veya ortadan kaldırılması için uygun düzeltici veya önleyici faaliyetler önerilmiştir. Park vd. [49], denizcilik sektöründeki siber güvenlik risklerini değerlendirmeyi ve denizde ve kıyı bölgelerinde güvenliği artırmayı amaçlamaktadır. İlk olarak, literatür taraması ve uzman görüşlerine dayanarak sektördeki ilgili tüm siber tehditler tanımlanmıştır. HTEA'nın kural tabanlı bayes ağı (RBN) ile birleştirildiği, denizcilikte yeni bir siber tehditleri risk değerlendirme çerçevesi önerilmekte ve belirlenen tehditlerin risk seviyelerini değerlendirmek ve genel denizcilik siber güvenliğine en çok katkıda bulunan tehditleri daha iyi anlamak için kullanılmaktadır. Sonuçlar, paydaşları siber operasyonlarındaki en hassas kısımlar hakkında bilgilendirebilir ve risk temelli kontrol önlemlerinin geliştirilmesini teşvik edebilmektedir. Daha spesifik olarak, siber tehditleri yönetmek için bir sonraki adım, kabul edilemez risk seviyeleriyle ilişkili tehditleri ele almak ve bunları yönetmek için uygun maliyetli önlemler olarak belirlenmiştir. Liu vd. [50], dengesiz tereddütlü bulanık dillimsel terim kümeleri (UHFLTSs) ortamında uzman güvenilirliğini dikkate alarak IDG risk tanımlama ve sınıflandırma için bir hata türü etkileri analizi (HTEA) yaklaşımı oluşturmuştur. İlk olarak, UHFLTS'ler karar vericilerin (KV) belirsiz ve kesin olmayan dilsel bilgilerini etkili bir şekilde tanımlayabildiğinden ve pratik uygulamalara uyarlayabildiğinden, KV'lerin değerlendirmesini tasvir etmek için özel olarak seçilmiştir. İkinci olarak, uzmanların önem seviyesi, uzman güvenilirliği ve uzman ağırlığı birleştirilerek tam olarak değerlendirme yapılmaktadır çünkü uzman güvenilirliklerindeki varyasyonun nihai sıralama sonuçları üzerinde önemli bir etkisi olabilir. Buna ek olarak, risk faktörü ağırlığını belirlemek için grup en iyi-en kötü yöntemi (GBWM) entropi yöntemiyle birleştirilmiştir. Üçüncü olarak, sınıflandırmanın doğruluğunu ve istikrarını artırmak için, arıza modlarını daha rasyonel bir şekilde sınıflandırmak üzere yeni bir entegre TOPSIS-ELECTRE TRI karar çerçevesi önerilmiştir. You vd. [51], geliştirilmiş bir HTEA'ya dayalı veri varlıklarının kalite risklerini proaktif olarak değerlendirmek için bir çerçeve önermiştir. İlk olarak kalite risk ölçümleri, literatür araştırması ve uzman görüşleri yoluyla yaşam döngüsü perspektifinden tanımlamalar yapılmıştır. Daha sonra uzman değerlendirmesine ilişkin belirsiz ve karmaşık bilgileri ifade etmek için üçgen bulanık sayılar benimsenmiştir. Daha sonra, risk kontrolünün zorluğunu tanımlamak için yeni bir risk faktörü 'C

tanıtılmış ve risk faktörlerinin ağırlıklarını hesaplamak için bir VZA yaklaşımı uygulanmıştır. Son olarak, önerilen HTEA değerlendirme çerçevesini göstermek için pratik bir örnek sunulmuş, veri varlık kalitesi risklerini kontrol etmek için çeşitli öneriler sunulmuştur.

Literatür araştırmalarından elde edilen sonuçlara göre, HTEA'nın metotsal eksikliğini gidermek açısından çeşitli çok kriterli karar verme yöntemlerinin ve bulanık yaklaşımların yönetime entegre edildiği görülmektedir. Literatürde farklı uygulama alanlarında

HTEA' dan yararlanıldığı görülmektedir. Havacılık sektöründe yapılan çalışmaların kısıtlı olduğu halen bu alanda ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu çalışmada önerildiği gibi entropi tabanlı ağırlıklandırma yaklaşımıyla havalimanlarında ortaya çıkan hata türleri çevresel, teknolojik ve donanımsal sınıflandırma altında objektif bir karar verme yaklaşımıyla değerlendiren çalışmaya rastlanmamıştır. Bu açıdan literatüre katkı sunması beklenmektedir. Tablo 1'de özet literatür araştırması sunulmaktadır.

Tablo 1. Literatür araştırması

Yazar	Uygulama alanı	Metot
Chang [32]	Yüksek teknoloji endüstrisi	TOPSIS ve HTEA
Liu vd. [33]	LCD parça üretimi kalite sorunu	QFD ve tasarım HTEA yöntemi
Hajiagha vd. [34]	Toplu ulaştırma sisteminde	Bulanık HTEA yöntemi +bulanık inanç yapısı + VIKOR yöntemi
Romdhane vd. [36]	KOBİ'lerde 6-Sigma	HTEA ve AHP yöntemlerini
Chiu vd. [42]	Ürün hizmet kontrol sürecinde	HTEA ve gri ilişkisel analiz yöntemi
Ahmadi vd. [35]	Karayolu inşaat proje risk değerlendirme çalışması	Bulanık HTEA ve bulanık AHP
Liu vd. [46]	Sistem, ürün ve süreç iyileştirme	Bulut model teorisine ve gri ilişki analizi yaklaşımına dayanan yeni bir HTEA yaklaşımı
Göktaş [25]	Havalimanının karbon akreditasyon sürecinde	HTEA
Liu vd. [41]	Gaz istasyonunda gaz tedarigi ve güvenlik riski süreçlerinin değerlendirilmesi	Yeni bir HTEA yaklaşımı+ Entropi
Fattahi ve Khalilzadeh [37]	Çelik endüstrisi	AHP, MULTIMOORA ve bulanık çok amaçlı optimizasyon yöntemleriyle HTEA için yeni hibrit bir model
Kumar vd. (2018) [43]	LPG gaz tedariki istasyonunda	Bulanık HTEA ve bulanık gri ilişki analizi
Nie vd. [38]	Atık su sistemlerine yönelik risk değerlendirmede	HTEA + BWM + COPRAS
Arabsheybani vd. [44]	Tedarik zinciri süreç yönetimi	FMOORA + bulanık çok amaçlı optimizasyon modeli+ HTEA
Cano-Olivos vd. [39]	Tedarik zinciri satınalma süreci	AHP ve HTEA
Chen vd. [45]	Risk analizi değerlendirmeleri- case study	Choquet integrali+ sıralı ağırlıklı geometrik ortalama + bulanık HTEA

Uslu [40]	Savunma ve havacılık sanayisine	HTEA ve çok kriterli karar verme teknikleri
Omairey vd. [26]	Uçak yakıt verimlilik mekanizması	HTEA
Kusumasari vd. [30]	Google haritalar	HTEA
Mendes vd. [31]	Havacılık sektöründe literatür araştırması	Proaktif, interaktif ve öngörücü önlemlerden oluşan yöntemler için literatür araştırması
Elahi [27]	Risk analizi için tehlike sınıflandırmaları	Hata ağacı analizi +HTEA
Mentes [47]	Aliağa gemi geri dönüşüm tesislerinde	HTEA+ OWGA+ FVIKOR + dayanıklılık mühendisliği
Ceylan vd. [28]	Karmaşık mühendislik sistemleri	Sistem teorik kaza modeli ve süreç modeli (STAMP)+ HTEA + AHP yöntemlerine dayanan hibrit model
Park vd. [49]	Denizcilik sektörü	HTEA' yı kural tabanlı bayes ağı birleştiren model yaklaşımı

III. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA)

Hata türleri ve etkileri analizi; mevcut bir durum veya olay/akış için potansiyel hata çeşitlerini analiz etmek için ortaya çıkan hataların olma olasılıklarına ve benzerliklerine göre gruplayarak ayıran bir ürün süreç iyileştirme yöntemidir [10]. Operasyonel süreç yönetim konularında yaygın ve etkin biçimde kullanılmaktadır. İyi tasarlanmış HTEA prosesi, yakın özelliklerdeki ürün grupları veya süreçlerin daha önceki durumları tespit edilerek hata türlerinin tespitinde yardımcı olur, bu hataların mevcut durum akışında en tasarruflu biçimde ürünün geliştirilme ve iyileştirilme süresini ve maliyetini düşürür [11]. Genellikle üretim sektöründe ürünlerin farklı kademelerinde yararlanılmakla beraber hizmet sektöründe de kullanım alanı yoğunlaşmıştır. HTEA' nın asıl çalışma prensibi, hatayı sonradan yakalamak ve revize etmek yerine hatanın önceden tespit edilmesi temkinli biçimde önüne geçmek ve tasarım aşamasından itibaren hataların olası nedenlerinin incelenmesidir. Bu yüzden toplam kalite yönetim sürecinde de önemli bir işleve sahiptir. Bütüncül ve sistematik bir yaklaşımla süreç genel hatlarıyla değerlendirilmekte ve yeni ürün ve süreçlerde ortaya çıkabilecek tasarım hatalarının tekrarlanması önlenir [52].

HTEA; hataların nedenlerini belirleyip ortaya çıkmadan önce hataları çözüme ulaştırmaktadır. Sistemdeki riskleri analiz edip süreç güvenilirliğini artırır. Bir hatanın göreceli riski ve etkileri üç faktör ile belirlenerek tahmini yapılmaktadır.

•Şiddet

- Olasılık
- Saptanabilirlik

Süreç bilgileri kullanılarak, bu faktörlerin her birine 1'den 10'a kadar düşükten yükseğe bir derecelendirme yapılır. Üç unsur (şiddet*olasılık* saptanabilirlik) için çarpım işlemi yaparak, her potansiyel hata türü etkisi için bir risk öncelik puanı (RÖP) belirlenir. Risk öncelik puanına göre hata türünü en aza indirmek için onarıcı eyleme duyulan ihtiyacı sıralamak için kullanılır. RÖP'den bağımsız olarak önem derecesine göre yüksek değere sahip olan hatalarsa öncelikle en yüksek RÖP'lere sahip hata türlerine daha da dikkat edilmelidir. Tedbir alındıktan sonra, önem derecesi, olasılık ve saptanabilirlik sıralamaları yeniden değerlendirildikten sonra arıza için tekrardan yeni bir RÖP değeri bulunur. İyileştirme çabaları elde edilen tüm RÖP hata türleri yok sayılana kadar sürdürülmelidir. Genel olarak bu üç madde, uzmanlar tarafından onay verilen değerlendirme kriterlerine bağlı olarak tahmin edilmektedir.

HTEA' nın dört çeşidi vardır [53].

- Tasarım: Ürünün tasarım esnasında yani daha tam ortaya konulmadan önce riskli bölgeleri bulup ortaya çıkarmak için uygulanan HTEA çalışmasıdır.
- Proses: Üretim aşamasında ortaya çıkan hataları analiz etmek için kullanılır.
- Sistem: Bütün donanımlar tamamlandıktan sonra sistem sırasında çıkan bozuklukları elverişli hale getiren hata türlerine bakar.

•Hizmet: Üretim ve kalite güvencesiyle verilen hizmetlerdeki hataları azaltmaya yönelik bir çalışmadır.

Bir proseste en önemli husus, üretime hazır hale gelindikten sonra süreç veya ürün güvenilirliğinin sağlanmasıdır. Güvenilirlik müşteri memnuniyetini ve piyasada devamlılığı sağlayan önemli kriterdir. Müşteriler, aldıkları ürün için hizmet süresinin uzun periyotlu ve sürdürülebilir bir mekanizmayla yanıtlanmasını beklemektedir. Bu sebeple ürün veya süreç güvenilirliğinin sağlanması için öncelikle ortaya çıkma potansiyeli olan hataların analiz edilmesi ve risk analiziyle çok boyutlu bir şekilde değerlendirmesinin yapılması buna göre süreç güvenilirliğinin sağlanması gerekmektedir.

3.1.1 HTEA türleri

HTEA temel olarak dört ayrı şekilde ele alınmaktadır. Bunlar Sistem HTEA, Proses dediğimiz Süreç HTEA, Servis HTEA ve Tasarım HTEA'dır. Bu çeşitlilik yapılırken en çok kullanıldığı bütünsel bir yöntemle alt hedeflere önem verilmiştir. İlk başta Stamatis'in ortaya çıkardığı bu çeşitlilik Şekil 1'de gösterilmiştir [59].

3.1.1.1 Sistem HTEA (SHTEA)

Sistemlerin ve alt sistemlerin daha yapılandırma bölümündeyken en kullanışlı hale gelmesi için yapılan analizlerdir. Yapılan analizler, daha doğru ve sistemli çalışabilmesi ve eksiksiz devam etmesi yönündedir. Tüm donanımların ve tasarımın tamamen bitmesinin ardından üretim ve kalite gibi sistemlerin gidişatını analiz etmek için kullanılır. Yani genel olarak odak noktası sistemdeki hataları en aza indirgeyerek sistemin kalitesini, güvenilirliğini, işleyişini arttırmaktır [12].

- Sistemdeki noksanlıkları meydana getiren hususların, açık bir şekilde ortaya koyarak,
- Sistem tasarım seviyesinde olduğu için faydalı olan tasarımı seçerek,
- Hataları ortaya çıkarıp, hataya sebep olan teşhisler için bulunan prosedür ve talimatlara alt zemin oluşturarak,
- Hataların oluşabilme ihtimaline karşın sistemdeki hataların sebeplerini bulup azaltarak,

HTEA'ya katkıda bulunmuştur.

3.1.1.2 Proses HTEA (PHTEA)

Diğer adı Süreç HTEA olan, genellikle süreçte olabilecek hataları ve bu hatalara karşı tespit edilen çözüm değişikliklerini öneren bir yöntemdir. Tasarımı bitmiş bir ürünü sıfır hata ile müşteriye ulaştırmak için hizmet ve üretim sırasında meydana gelebilecek hataları belirlemeye çalışır [12]. Üretim ve montaj işlerini düzeltmek için kullanılır. Sistemde gözden

kaçırılan olası hataları tekrar analiz etmek için proses HTEA kullanılır [54].

- Süreç kusurlarını tamamlayarak,
- İyileştirme faaliyetlerinde öncülük sağlayarak,
- İmalat ve montaj sürecine yardımcı olarak,
- Çalışanların soruna çekerek sürecin olumsuzluklarını ortaya koyarak,

HTEA'ya katkıda bulunmuştur.

3.1.1.3 Tasarım HTEA (THTEA)

Müşteri her ürünü tasarımında hatasız görmek ister. Bu yüzden ürünün tasarımı esnasında yani daha tam ortaya konulmadan önce riskli bölgelerin bulunup ortaya çıkarılması için yapılan HTEA çalışmasıdır [55]. İlk üretim olmadan hataların belirlenmesi ve iyileştirici faaliyetlerin uygulanmasını sağlayan analitik bir yöntemdir. Tasarım yaklaşımlarıyla ilgili karar tanımlayıp seçenekleriyle değerlendirilen yararlı bir metottür [54].

- İyileşme için çalışmalarında öncelikleri belirleyerek,
- Olası hataların ürün üretilmeden önce hataları tespit ederek,
- Tasarım esnasında yapılan gerçek bir belge sistemi ile gelecek ürün tasarımları için rehberlik ederek,
- Kritik noktaları belirleyerek,

HTEA'ya katkıda bulunmuştur.

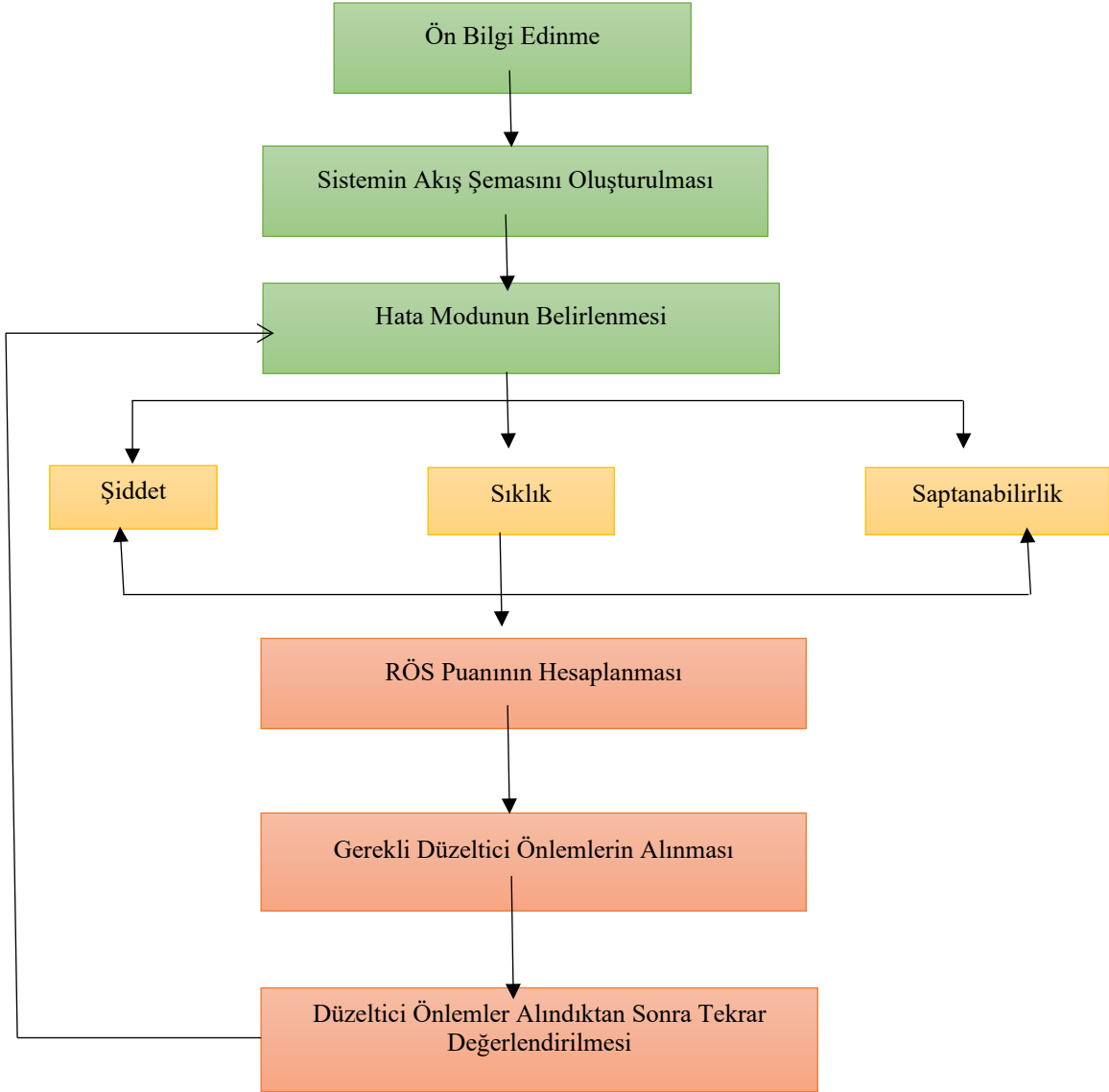
3.1.1.4 Servis HTEA (SeHTEA)

Müşteriye ulaşmadan, üretim, kalite güvencesini analiz ederek hataları kontrol altına alır. Bu hatalar ya servise ya da sisteme ait hatalardan gelen görev hataları üzerinde durulmuştur. Genel anlamda odaklandığı nokta, organizasyondaki hataları en aza indirgeyerek, kalitesi ve güvenilirliğiyle amacı müşteri memnuniyet oranını yüksek tutmaktır [56].

- İşlem yetersizliğini belirleyerek,
- İş akışını analiz ederek,
- Müşteri bazlı amaçladığı, müşteri talep ve memnuniyeti artırarak hataları organize edilerek,
- Sunulacak olan servisin kalite güvencesini artırarak,

- Gerçekleştirilen belgeleştirme sayesinde yapılan hataların tekrarlanmamasını engelleyerek, HTEA'ya katkıda bulunmuştur.

3.1.2 HTEA uygulama aşaması



Şekil 1. HTEA uygulama aşamaları

3.1.2.1 Hata türünün belirlenmesi

"Hata türü" terimi, bir ürünün veya bu ürünün bir bileşeninin kullanım ömrü anlamına gelir. Sürekli olarak beklenen fonksiyonel faydaları karşılayamayan bir durum olarak özetlenebilir.

Hata türünü belirlerken her işlevsel parça veya bileşen için ayrı ayrı karar verilmelidir. Ancak hatanın türü belirlenirken bir hata olmak zorunda değildir. Olası hatalar bu varsayıma göre belirlenir. Hata türü aslında bir performans sorunudur. HTEA çalışmaları mevcutsa, bu çalışmalar başarısızlık modlarını belirleyebilir. Tanımlanan hata türünü görmek yararlıdır. Hangi HTEA değişkeninin kullanıldığına bakılmaksızın hata türü bir karar verdikten sonra yapılacak ilk şey, fonksiyonel parçaları veya bileşenleri belirlemektir. Bir sonraki adım, hatanın etkisini belirlemektir.

3.1.2.2 Hata etkisinin belirlenmesi

Bir kusur, ürünün çalışmasını, işlevini veya durumunu etkiler. Ürettiği sonuçlar HTEA ekibi tarafından beyin

fırtınası faaliyetleri sonucunda belirlenir. Her hata modunun etkisi hem yerel hem de küreseldir (sistem). Müşteri memnuniyeti, hata modlarının etkisini belirlemek için önemlidir. Hata etkisi, fonksiyonel parça veya bileşeni tanımladıktan sonra arıza tipinin etkisidir. Yöntemin uygulanması sırasında yapılan değerlendirmelerde risk analizi ile hataların önceliğini açıklayan üç bileşen şu şekildedir:

3.1.2.3 Hata şiddeti (Ş)

Hata şiddeti, meydana gelen veya meydana gelebilecek hata türünün bir sonucudur. Şiddet, bir hatanın ciddiyetini tanımlar. Müşteriye yansıtılabilecek hata sonuçlarının miktarı değerlendirilir. Şiddet, yalnızca bir tür yanlış eylemle uygulanır. Şiddet konusu hatanın sonuçlarına ait bir kavramdır. Ürünün parçaları, sistemleri, alt sistemleri ve grupları, ürünün kendisi, yasa ve müşteri tarafından yapılan her tür hatanın ciddiyet derecesidir. Bu değerlendirme hatalara ait derecelendirmeyi verecektir [12]. Şiddet derecelendirme tablosu Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Şiddet derecelendirme

Kriter	Derece
Hata, çok büyük memnuniyetsizliğe, sistemin durmasına ve yasalarla uyumsuzluğa yol açar.	10
Hata, yüksek derecede müşteri memnuniyetsizliğine yol açar ve sistemin işlevselliğini etkiler.	8-9
Hata, müşteri memnuniyetsizliği ile sistem performansının düşmesine neden olur. Onarım gerekir.	6-7
Ürün performansı veya süreç üzerinde küçük şiddette etki. Hata müşteri tarafından fark edilir ve ürün kullanımında bazı rahatsızlıklar yaşanır.	3-5
Ürün performansı veya süreç üzerinde önemsiz etki. Hata müşteriler tarafından fark edilmez.	1-2

3.1.2.4 Hata olasılığı(O)

Farklı hata türleri, farklı türde hatalar doğurur. Hatanın ortaya çıkabilme durumunu anlatır. Yani hatanın frekansını verir. Her bir hata türü için önceden belirlenmiş olasılık değeri ile hata nedeninin olasılık değeri çarpılarak belirlenir[12]. Bir hata nedenine olasılık değeri şu şekilde atanır: başka bir durum, bu

durumda, başka bir alternatif durum, arıza nedeninin etki düzeyini dikkate almak ve her arıza tipine karşılık gelen bir olasılık değeri atamaktır. Olasılık değerleri Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Hata olasılık değerleri

Hata Olasılığı	Olası Hata Oranları	Derece
Hemen hemen kesin	½'den fazla 1/3	9-10
Çok yüksek Yüksek	1/8	7
	1/20	8
Orta	1/80	4
	1/400	5
	1/2000	6
Düşük Çok Düşük	1/15000	2
	1/150000	3
Hemen Hemen Olanaksız	1/1500000'den düşük	1

3.1.2.5 Hata tespiti (T)

Hata türünün tüketiciye ulaşmadan önce tespit edilmesidir. Yani üretim esnasında birkaç aşamadan geçmesi gerekir ve tespit edilen hatanın giderilmesi gerekir. Saptama ile alakalı ihtimal değerleri ortaya

çıkan hata değerlerinin müşteriye ulaşmamasıdır. 1-10 arası derecelendirme yapılarak tanımlanan hatanın bir kusuru bulma ihtimalinin belirlenmesidir[12]. Hata tespit tablosu Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Tespit Etme

Tespit Etme	Derece
İmkansız	10
Çok Zor	9
Zor	8
Çok Az	7
Az	6
Orta	5
Ortanın Üstü	4
Yüksek	3
Çok Yüksek	2
Hemen Hemen Kesin	1

3.1.3 Risk öncelik sayısı (RÖS)'nin hesaplanması

Hatalar, şiddet, olasılık ve tespit edilebilirlik değeri kullanılarak risk yaratabilecek hataların önceden öğrenilmesi amacıyla hesaplanarak ortaya çıkması gereken sayısal değerlerdir[12]. Her olabilecek hatanın türleri ve etkisi bu üç faktörde ölçek ile değerlendirilerek hesaplama işlemi yapılır. Ölçeklendirme işlemi ile hangi hatanın üzerinde durulması gerektiği belirlenir. Yani hataların birbirine nazaran önem dereceleri belirlenerek hataları büyüklüğüne ve küçüklüğüne göre sıralama yapar.

Risk öncelik sayısının hesaplanmasında genel olarak kullanılan, hata şiddeti, hata olasılığı ve hata tespitine ilişkin değerlerin çarpım işlemi yapılarak hesaplanır [57].

- $RÖS = \xi x O x T$
- $RÖS < 40$ ise iyileştirme yapmaya gerek yoktur.
- $40 < RÖS < 100$ ise iyileştirme işlemi gerekebilir.
- $RÖS > 100$ ise iyileştirme işlemi kesin yapılmalıdır.

RÖS puanı belirlendikten sonra gerekli iyileştirmeler yapılır [58]. Düzeltici önlemler ile RÖS değerleri en aza indirgenmeye çalışılır[12]. En aza indirgenirse yapılacak olan iyileştirme çalışmaları azalacaktır. Bu değerlerin küçülmesi için de olasılık, şiddet ve tespit değerlerinin küçük olması gerekir. Gerekli

iyileştirmeler yapıldıktan sonra tekrar RÖS puanı hesaplanır ve gereken en az değere ulaşılmış ise sonuç başarılıdır [58, 59].

3.1.4 Düzeltici önlemlerin belirlenmesi

Düzeltici önlemler, olabilecek hata türlerini veya sebeplerini en aza indirmek için veya tamamen kaldırmak için veya olumsuz etkilerini sıfırlamak için modelleme, üretim süreci, malzeme veya üretim metodu gibi farklı verilerle uygulanabilecek farklılıklardır. Düzeltici önlemler ile RÖS değerleri en aza indirgenmeye çalışılır. Bu yüzden hata olasılığı, hata tespiti ve hata şiddeti değerlerini en aza indirmek gerekir [59]. Bu sebeple şu tavsiyelere uymak gerekir:

- Hatanın meydana gelebilme ihtimalini en aza indirmek için süreç yahut tasarımın tekrar optimize edilmesi gerekir.
- Şiddet değerini azaltmak için sadece tasarımın optimize edilmesi gerekir.
- Hata tespit ihtimalini arttırmak için, süreç işlemi tekrardan gözden geçirilmelidir. Kalite kontrol işlemlerinin çoğaltılması için olumlu bir düzeltici çalışma yapmak yerine çok zor olaylarda geçici bir düzeltme çalışmasıdır. Burada önemli husus, hataları bulmaktan ziyade onların meydana gelmesini engelleyecek faaliyetlerin çoğaltılmasıdır.

3.1.5 İzleme

Analizin bu aşaması, yapılması gereken önleyici hataların, yeterli faaliyette kullanılmaya uygun görülüp görülmediğinin doğrulanması ve yeni etkilerin incelenmesi değerlendirilmesi adıdır. Düzeltici önlemlerin devreye alınması bakımından fazlasıyla önemlidir. Bu adımda RÖS dereceleri en aza indirgenene kadar çözümler araştırılır ve değerlendirilme sürecine alınır. İzleme aşamasıyla birlikte:

- Düzeltici önlemlerin alınması,
- RÖS derecelerinin azaltılması,
- Yapılan iyileştirmelerin devamlılığı sağlanır.

Oluşabilecek hataların sebeplerine engel olmak için araştırılan yeni önlemler, izleme aşamasından sonra uygulanmaya başlanır [58, 59].

3.1.6 Doğrulama

Yapılan tüm işlemlerin hatasız olduğunu gösterebilmek için yapılan analizin en son adıdır. Bu adımda amaç:

- Ürünün üretimine başlamadan önce, düzeltici önlemlerin uygulanıp doğrulanması,

- Sistemin ise süreç içinde herhangi bir değişikliğe uğramamasının doğrulanmasıdır.

3.2 Entropi Yöntemi

Entropi kavramı, mühendislik, fen gibi pek çok temel bilim dalında matematik ve bilgi teorisinde kullanılan önemli bir kavramdır. Öncelikle, termodinamik konusunda Rudolph (1865) tarafından geliştirilmiş ardından Shannon (1948) [60] tarafından bilgi entropisi konusuna evrilmiştir.

Entropi yöntemi karar problemlerinde kriterlerin önem seviyelerini belirlemede kullanılan AHP, Delphi yöntemleri gibi karar verici subjektif yargılarına gerek kalmadan değerlendirme imkanı sunan bir objektif değerlendirme metodudur. Yöntemin aşamaları sırasıyla aşağıda verilmiştir [61].

$$\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (1)$$

burada x_{ij} : i . alternatifin j . kritere göre başarı değeridir, $i = 1, 2, \dots, m$ ve $j = 1, 2, \dots, n$.

1. Karar matrisi normalizasyonu:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (2)$$

i : alternatif j : kriter r_{ij} : normalize değerler

x_{ij} : i . alternatifin j . kriter için karar matrisinde karşı gelen değeri

2. Kriterlere ait entropi değerlerinin elde edilmesi:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln(r_{ij}) \quad \begin{matrix} i = 1 \dots m \\ j = 1 \dots n \end{matrix} \quad (3)$$

k , entropi sabiti, e_j entropi değeri

$$k = 1/\ln(m) \quad (4)$$

3. Bilginin farklılaşma derecesi hesabı

$$d_j = 1 - e_j \quad (5)$$

4. Entropi kriter ağırlıklarının hesaplanması

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^m d_j} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n w_j = 1 \quad (7)$$

IV. UYGULAMA

Bu çalışmada amaç, havacılık sektöründe hava alanı bakım yönetim faaliyetleri kapsamında HTEA ve karar verme yöntemlerini iki aşamalı bir yapı ile analiz ederek mevcut sistem yapısını etkileyen sorunların giderilmesi ve öncelikli risk seviyelerinin tespit edilmesi ve buna göre bütçe kısıtı altında yönetici ve yetkililerin alacağı yatırım kararlarına yardımcı olmaktır.

Öncelikle hava alanı yetkilileriyle görüşülerek HTEA analizi için önemli risk faktörleri ortaya konulmuş, ardından bu risk faktörlerinin objektif biçimde değerlendirilmesi için karar verme araçlarıyla analitik biçimde analiz gerçekleştirilmiştir.

Araştırma için, farklı havalimanı çalışanlarıyla odak grup toplantıları yapılmış anket uygulanmış ve gerekli veriler temin edilmiştir. Çalışma için ulaşılamayan havalimanı çalışanları için çevrimiçi anket uygulanmıştır. Çalışmada işletmelerin veri gizliliği politikası gereği alınan bilgi ve veriler ile yapılan anket açık biçimde paylaşılamamaktadır.

Ankete geniş katılım sağlanmasının istenme nedeni çalışanların hava alanları için hangi faktörleri riskli gördüklerinin belirlenmesidir. Yöntemin eksik noktalarından biri olan karar vericilere bağlı kalması ve özellikle kritik faktör olabilecek birkaç hata türünün olması ancak bunu ayırıştırıcı kısmının şiddet, olasılık ve tespit edilebilirlik kısımlarındaki sayısal niceliğin doğru tayin edilmesi hususunda olduğu anlatılmıştır.

Çalışmada değerlendirilen sorular çerçevesinde ve yönetici takımındaki görüşmeler sonucunda 21 temel hata türü belirlenmiştir. Havalimanı yöneticileriyle hata türü etkileri analizi için önerecekleri kişilerden takım oluşturup konu hakkında kapsamlı bir araştırma yapılması istenmiştir. Buna göre risk analizi ekibi kendi önerdikleri kıdemli çalışanlar arasından belirlenmiş ve beyin fırtınası yapılarak tüm sorunlar ortaya konulmuştur. Delphi yöntemi ile en önemli olabilecek hata türleri ilgili ekipçe kesinleşmiştir. Ekip üyelerine hata türü etkileri analizi hakkında bilgi verilmiş, analizin çalışma prensibi anlatılmıştır. Yöntemin olası yanlış yorumlama ve RÖS değerlendirme kısımlarında hesaplamalar konusunda örnekler verilerek açıklanmıştır. Anketlerde özellikle şiddet, olasılık ve tespit edilebilirlik konusunda nasıl değerlendirmeler yapıldığı incelenerek aralarından en tecrübeli ve daha önce risk analizi uygulamaları konusunda çalışmış donanımlı uzmanlar seçilerek onların görüşü ile geometrik ortalama operatörü kullanılarak uzman görüşleri birleştirilmiştir. Entropi yöntemi uygulanırken çalışmada tutarlı ve anlamlı katkı sunan havalimanı yöneticilerinin görüşü temel alınarak analiz gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde HTEA'nın subjektif tarafının daha objektif yöntemlerle birleştirilerek dayanaklı ve tutarlı bir uygulama yapılması amaçlanmıştır.

Yapılan anketlere bakıldığında, HTEA analizi kullanılarak 21 farklı hata türü ve veya/risk faktörü ortaya konulmuş ve bu sorunların çıkardığı olumsuz etkiler tespit edilerek gerekli çözüm önerileri sunulmuştur. Buna göre RÖS değerleri ve kabul edilebilir yeni RÖS değerleri belirlenmiştir. Genel olarak havalimanlarındaki bakım onarım faaliyetlerinin sürdürülebilir hale getirilmesinin sağlanması için yapılan anket ve hesaplamalar doğrultusunda gerçekleştirilen analiz değerlendirmeleri son derece önemlidir. Çalışmada çevreye duyarlılık ve karbon salınımı unsurları da değerlendirilerek çalışmanın çerçevesi daha kapsamlı ve güncel hale getirilmiştir. Sanayi geliştikçe, emisyon salınımı da onunla birlikte artmaya devam edecektir. Hava yolu taşımacılığı emisyon salınımına büyük ölçüde yol açan ulaştırma modlarından biridir. Emisyon salınımı tamamen ortadan kaldırılmasa bile en aza indirgeyecek önlemler alınabilir. Yapılacak çalışmalarla da çalışan, yönetici, havaalanında temin edilen araçlar için en uygun olanaklar ve çevreye daha az etki eden unsurlar belirlenecektir. Bu unsurlar doğrultusunda yaptığımız çalışmada iki aşamalı bir yöntem kullanarak Endüstri 4.0 teknolojisi ve karbon emisyon salınımını en aza indirgeyecek bakış açısıyla havaalanında en uygun bakım yönetim planlamasını ele alacak uygun bakım-yönetim stratejisi değerlendirilmektedir. Buna göre gerekli önlemler alınarak iyileştirme önerileri yapılmaktadır.

Yolcu ve yük taşımacılığı havacılık sektöründe çok önemli hususlardır. Havacılıkta sürdürülebilirlik ilkesi çerçevesinde uçuş emniyeti ve havacılık güvenliğinin uluslararası prosedürlere uygun biçimde sağlanması gerekmektedir. Bu açıdan devlet ve özel işletmeciler tarafından gerçekleştirilen bakım, onarım ve yenileme faaliyetleri havacılıkta güvenlik ve emniyetin sağlanması için kritik öneme sahiptir. Havacılık sektörünün son teknolojik ekipmanlarla desteklenmesi tedarik ve lojistik faaliyetlerinin titizlikle sürdürülmesi ayrıca günümüz gelişmelerini hızlı adapte edilebilmesi sayesinde rekabet koşullarında Endüstri 4.0 ile uyumlu teknolojilerin kullanılması vazgeçilmezdir.

Havacılıkta uygulanan bakım faaliyetleri yaygın biçimde uçuş öncesi ve uçuş sonrasında gerçekleştirilen bakımlar şeklinde düzenli olarak yapılan ve takip/kontrol işlemleri ile daha detaylı bir şekilde yapılan süreç ve proseslerden meydana gelmektedir. Buna göre farklı kategorilerden oluşan bakım onarım kontrolleri söz konusudur. Bu kontroller yolcu kabini, motor bağlantı aksamı, kanat, tüm hareketli parça kontrolü gibi uçuş sürelerine bağlı düzenli sıklıkta yapılan ciddi bakım faaliyetleridir. Ayrıca sivil havacılık faaliyetleri kapsamında değerlendirilecek hat bakımı, üs bakımı ve komponent bakımı gibi uçak

aprondayken yapılması gereken bakımlardır. Tablo 5'te HTEA'nın uygulaması gösterilmektedir. Tanımlanan tehlikeler ve karşı gelen RÖS değerleri ile risk azaltma çalışmalarından sonra yeni RÖS değerleri tabloda

gösterilmektedir. Uzmanlardan alınan görüşlerle hazırlanan HTEA tablosunda görüleceği gibi iyileştirme çalışmalarından sonra elde edilen yeni RÖS

değerleri önceki duruma göre düşmüştür, daha iyi seviyededir.

Tablo 5. Havacılık sektöründe HTEA analizi uygulaması

NO	Tanımlanmış tehlikeler	Zarar	RÖS değeri				Risk azaltma çalışmaları	Yeni RÖS değeri			
			P	S	D	RÖS		P	S	D	RÖS
01	İklimlendirme ekipmanları ve ısınma grubunun gereğinden fazla çalışması.	Elektrik tüketiminin artması neticesinde karbon salınımının artması.	5	5	5	125	Isıtılan hacmin homojen dağılması için projeler geliştirmek. Bina yalıtım elemanlarının kullanılması, çift kapı kullanılması vb.	3	3	4	36
02	Fazla elektrik tüketen teknolojik aletlerin kullanılması.	Elektrik tüketiminin artması neticesinde karbon salınımının artması.	5	6	3	90	Daha az elektrik tüketen teknolojik aletlerin kullanılması.	3	3	3	27
03	Uçağın fosil yakıt kullanması.	Yakıt tüketiminin artması neticesinde karbon salınımının artması.	7	7	5	245	Biyoyakıt kullanılması.	3	4	3	36
04	Çok yakıt tüketen uçakların kullanılması.	Yakıt tüketiminin artması neticesinde karbon salınımının artması.	8	6	5	240	Az yakıt tüketen uçakları tercih edilmesi.	4	4	4	64
05	Topla dağıtım ağ sisteminin olmaması.	Yakıt tüketiminin artması neticesinde karbon salınımının artması.	7	6	4	168	Az sayıda uçak seferlerinin olması.	4	3	4	48
06	Pist kapasitesinin az olması gecikme sürelerinin artması.	Yakıt tüketiminin artması neticesinde karbon salınımının artması.	7	5	3	105	Pist kapasitesinin artırılması.	4	3	3	36
07	Uçak motor ve gövde bakım periyodunun aksatılması	Bakım periyotlarının kaçırılması yüzünden beklenmedik arıza ve uçuş rötaları	7	6	4	168	Bakım periyotlarının aksatılmadan yönergelere uygun sıklık ve hassasiyette yapılması	3	4	4	48
08	Uçak kanat ve bağlantı parçalarının kontrol edilmemesi	Bakım periyotlarının kaçırılması yüzünden beklenmedik arıza ve uçuş rötaları	8	6	5	240	Her iniş ve kalkıştan sonra bakım rutinlerine dikkat edilmesi	5	4	3	60

09	Uçak aprondayken hat bakım ve üs bakım kontrollerinin yapılmaması	Bakım periyotlarının kaçırılması yüzünden beklenmedik arıza ve uçuş rötarları	8	6	5	240	Bakım çalışmalarının özenli sürdürülmesi	4	5	3	60
10	Uçak yakıt kullanımının artırılması ve verimliliğinin azalması	Tasarruflu kullanılmayan yakıt yüzünden yüksek maliyet, karbon salınımında artış ve etkin olmayan uçuş hizmetleri	5	4	4	80	Verimli, çevre dostu yakıtların tercih edilmesi	4	3	3	36
11	Uçak aerodinamik temizliğinin sağlanmasında aksaklık	Uçak bakım onarım faaliyetinin aksaması ve uçak kazası	8	8	4	256	Hijyen şartlarının aksatılmadan sürdürülmesi	4	4	4	64
12	Uçak sistem kalibrasyonunun yapılamaması	Uçak bakım onarım faaliyetinin aksaması ve uçak kazası	9	8	5	360	Olası kazaların önüne geçmek için periyodik sistem bakım ve kontrol çalışmalarının teknik destek ekibince değerlendirilmesi	5	3	3	45
13	Endüstri 4.0 faaliyetleri ile entegrasyon çalışmasının sağlanamaması	Güncel teknolojiye entegre olmayan uçak uçuş sistemlerinde kaynaklı gecikme, rötar ve doğru çalışmayan optimizasyon modelleri ile hatalar	5	4	3	60	Endüstri 4.0 gelişmeleriyle entegrasyonu tamamlanmış sistemlerin kullanılması	3	3	3	36
14	Arttırılmış gerçeklik (AR) uygulamalarının uçak sistemlerine katılamaması	Karmaşık seviyedeki bakım faaliyetlerinde verimliliğin sağlanamaması, arttırılmış gerçeklik teknolojisinin katılmadığı uçak bakım eğitimlerinde başarısızlık, hatalar yetersiz kalitede uçuş testleri	4	4	3	48	AR uygulamalarının yaygınlaştırılması ile test sürüş, pilot eğitimi, uçuş sırasındaki tüm durumların simülasyonun sağlanması ile başarılı uçuşlar	3	3	3	36

15	Eklemeli imalat teknolojisinin uçuş imalat ve süreç yönetim aşamalarına dahil edilememesi	Bozulan, arızalanan ve yıpranan parçanın hızlı tedarikinin sağlanamaması, uyumsuz ve kalitesiz ve pahalı yedek parçalarla uzun süreçte masraf ve bakım planlama faaliyetlerinin aksaması	6	5	5	150	Eklemeli imalatla paralel çalışan yönetim felsefesi ile uygun kaliteli ve hızlı parça tedarikinin sağlanması	4	3	3	36
16	Aynı kompartmana yüklenmesi sakıncalı tehlikeli maddelerin aynı kompartmanda taşınması	Maddelerin tepkimeye girip yangına sebep olması	8	7	5	280	Tehlikeli madde taşımacılık yönergelerine uyulması	4	4	4	64
17	Göndericinin, ürünü prosedürüne aykırı kargolanması	Yanlış paketlenen ürünün uçağa zarar vermesi	7	5	4	140	Uygun paketlenmeyen ürünün yüklemesi yapılmadan önce tekrar kontrol edilmesi	3	4	4	48
18	Kullanılan uçaklarda sistem yetersizliği olması	Meydana gelen olayların geç fark edilmesi	8	6	5	240	Uçak bakımlarının daha sık yapılması	4	5	3	60
19	Tehlike anında yanlış müdahale veya müdahalenin geç başlaması	Gecikmeler ve geç tespitler olay ve kazaların daha büyümesine sebep olur	8	8	5	320	Olaylara müdahale konusunda yetersiz kalan mürettebatın AR ve VR ortamlarında eğitimler alması	4	4	3	48
20	Mürettebat arasında iletişim eksikliği	Herhangi bir kaza anında eksik iletişim kaynaklı mürettebatın olası olaylara karşı önlem alamaması	7	5	4	140	Verilen eğitimler dahilinde mürettebatın bir arada değerlendirilmesi gerekliliği, son teknolojik ekipman desteği ile iletişim sıklığı, ekip için uyumluluk sağlanması	3	4	4	48
21	Alınması gereken yenileme kurslarının yetersizliği	Kurs zaman aralıklarının uzun olması sebebiyle temel bilgilerin zayıflaması	6	4	4	96	Verilen kursların zaman aralığını sıklaştırarak, harici AR ve VR ortamlarında da eğitimlerini desteklemek	4	3	3	36

Havalimanları, yoğun insan trafiği ve yüksek güvenlik standartları nedeniyle çok hassas yerlerdir. Hata türleri genellikle operasyonel, teknik, güvenlik ve insan faktörleri gibi farklı kategorilere ayrılabilir.

Havalimanlarında yaşanabilecek hatalar, çok sayıda probleme neden olabilir. Bunlar arasında uçuşların gecikmesi veya iptal edilmesi, uçak kazaları, yolcuların mağdur olması, hava trafiğinin aksaması ve hatta ölümlü kazalar gibi ciddi sonuçlar yer alabilir.

Hata analizi, havalimanlarında güvenliği artırmak ve hizmet kalitesini iyileştirmek için önemlidir. Bu analiz, hata kaynaklarını, nedenlerini ve sonuçlarını tespit etmek için kullanılır. Bu bilgiler, gelecekte benzer hataların önlenmesine yardımcı olmaktadır. Havalimanı yöneticileriyle yapılan görüşmeler sonucunda yaşanabilecek hataların türleri arasında, teknik hatalar, personel hataları, hava koşulları,

güvenlik açıkları ve planlama hataları yer alabilir. Teknik hatalar, havalimanı ekipmanlarının veya sistemlerinin arızalanması gibi sorunları kapsamaktadır. Personel hataları ise görevlerin yanlış yapılması veya görev atamalarının yanlış yapılması gibi insan kaynaklı sorunlardır. Güvenlik açıkları, havalimanının güvenlik sistemlerindeki hatalardan kaynaklanan sorunlar olabilir. Planlama hataları ise, havalimanı faaliyetlerinin planlanması veya yönetimi sırasında ortaya çıkan sorunlardır. Tablo 6'da görüldüğü gibi ilgili hata türünün çevresel, teknolojik, teknik donanım ve personel kaynaklı olmalarına göre gruplandırılmıştır.

Tablo 6. Hata türü kaynakları

Çevresel	Teknolojik	Donanımsal	Personel
HT1	HT7	HT13	HT16
HT2	HT8	HT14	HT17
HT3	HT9	HT15	HT18
HT4	HT11		HT19
HT5	HT12		HT20
HT6			HT21
HT10			

Entropi yönteminde üç uzman görüşü alınarak olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik kriterlerine göre 21 hata türü değerlendirilmiştir. Birleştirilmiş uzman görüşü tablosu, normalize karar matrisi ve entropi ağırlık dereceleri aşağıda verilmiştir. Karar Matrisinin Oluşturulması: Çalışmada ilgili RÖS parametrelerinin

önem seviyelerinin belirlenmesinde objektif değerlendirme yaklaşımı olan Entropi yaklaşımdan yararlanılmıştır. Buna göre her hata türünün ilgili bileşenlerinin (olasılık, şiddet, tespit) üç uzman tarafından değerlendirme karar matrisi Tablo 7'de şu şekilde yer almaktadır.

Tablo 7. Karar verici görüşleri

KV1			KV2			KV3		
P	S	D	P	S	D	P	S	D
5	5	5	4	5	5	5	6	5
5	6	3	5	5	5	4	5	4
7	7	5	6	8	5	5	7	6
8	6	5	8	5	5	7	6	5
7	6	4	6	5	5	7	6	5
7	5	3	7	5	4	6	6	5
7	6	4	6	7	3	6	5	4
8	6	5	7	5	5	8	7	5
8	6	5	7	5	5	8	5	4
5	4	4	6	5	4	7	4	4
8	8	4	7	7	5	6	6	4
9	8	6	8	8	5	7	6	6
5	4	3	4	6	5	5	5	5
4	4	3	4	5	4	5	5	4
6	5	5	5	6	6	5	5	5
8	7	5	8	8	7	7	7	6

7	5	4	6	5	4	7	4	5
8	6	5	8	7	4	7	6	6
8	8	5	7	7	7	6	6	8
7	5	4	6	4	4	7	5	6
6	4	4	6	6	6	5	5	5

Ardından bu üç uzman görüşü geometrik ortalama operatörü ile birleştirilmiş ve aşağıdaki Tablo 8 elde edilmiştir.

Tablo 8. Birleştirilmiş Uzman Görüşü

P	S	D
4,641	5,313	5
4,641	5,313	3,914
5,943	7,318	5,313
7,651	5,646	5
6,649	5,646	4,641
6,649	5,313	3,914
6,316	5,943	3,634
7,651	5,943	5
7,651	5,313	4,641
5,943	4,308	4
6,952	6,952	4,308
7,958	7,268	5,646
4,641	4,932	4,217
4,308	4,641	3,634
5,313	5,313	5,313
7,651	7,318	5,943
6,649	4,641	4,308
7,651	6,316	4,932
6,952	6,952	6,542
6,649	4,641	4,578
5,646	4,932	4,932

Normalize edilmiş karar matrisi aşağıda Tablo 9’da formül yardımıyla ilgili kriterin ilgili sütun toplamına sunulmuştur. Entropi metodunun sunulduğu ikinci oranlanmasıyla normalize değerler elde edilmiştir

Tablo 9. Normalize Karar Matrisi

P	S	D
0,034	0,044	0,050
0,034	0,044	0,039
0,044	0,061	0,053
0,057	0,047	0,050
0,049	0,047	0,046
0,049	0,044	0,039
0,047	0,049	0,036
0,057	0,049	0,050
0,057	0,044	0,046
0,044	0,035	0,040
0,051	0,057	0,043
0,059	0,060	0,056
0,034	0,041	0,042
0,032	0,038	0,036
0,039	0,044	0,053
0,057	0,061	0,059
0,049	0,038	0,043

0,057	0,052	0,049
0,051	0,057	0,065
0,049	0,038	0,046
0,042	0,041	0,049

Kriterlere ilişkin entropi değerleri aşağıdaki Tablo 10'da paylaşılmıştır. Önceki tabloda yer alan normalize değerler ile logaritması alınan değerler çarpılmıştır. Ardından bu işlem sonucu hesaplanan değerler

toplanarak entropi değeri elde edilmiştir. Formülde yer alan k entropi katsayısı $1/\ln 21$ (0,328) hesabı ile bulunarak formüle adapte edilmiştir.

Tablo 10. Entropi değerleri

P	S	D
-0,1164	-0,1380	-0,1503
-0,1164	-0,1380	-0,1273
-0,1381	-0,1706	-0,1565
-0,1633	-0,1438	-0,1503
-0,1489	-0,1438	-0,1430
-0,1489	-0,1380	-0,1273
-0,1439	-0,1488	-0,1209
-0,1633	-0,1488	-0,1503
-0,1633	-0,1380	-0,1430
-0,1381	-0,1194	-0,1292
-0,1534	-0,1650	-0,1360
-0,167	-0,1698	-0,162
-0,1164	-0,1312	-0,1340
-0,1104	-0,1258	-0,1209
-0,127	-0,1380	-0,1565
-0,1633	-0,1706	-0,1684
-0,1489	-0,1258	-0,1360
-0,1633	-0,155	-0,1490
-0,1534	-0,1650	-0,1790
-0,1489	-0,1258	-0,1417
-0,1333	-0,1312	-0,1490

Buna göre elde edilen e_j değerleri 0,9946, 0,9956, 0,9960 şeklinde bulunmuştur. Ardından bilginin farklılaşma dereceleri 1'den çıkartılarak hesaplanmıştır (0,005347; 0,004368; 0,003945). Tablo 11'e göre faktörlerin entropi dereceleri ve her bir kriterin ağırlık

değeri şu şekilde bulunmuştur. Olasılık değeri 0,391, tespit edilebilirlik değeri 0,288 ve şiddet değeri 0,319 olarak elde edilmiştir. İlgili ağırlık değerleri entropi temelli HTEA analizinde kullanılmıştır.

Tablo 11. Faktörlere ait Entropi ve ağırlık değerleri

	P	S	D
Entropi	0,9946	0,9956	0,9960
w_j	0,391	0,319	0,288

V. UYGULAMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Hata analizi yapılırken, öncelikle hataların türleri ve sıklıkları belirlenir. Sonra, hataların nedenleri tespit edilir. Bu nedenler, teknik arızalar, personel eğitimi eksikliği veya hatalı yönetim kararları gibi çeşitli faktörlere bağlı olabilir. Son olarak, hata analizinin sonuçları değerlendirilir ve alınabilecek önlemler belirlenir. Sonuç olarak, herhangi bir havalimanında hata türü etkileri analizi hava limanı güvenliğini artırır, hizmet kalitesini iyileştirir ve hava trafiğinin daha güvenli ve verimli olmasını sağlar.

Havalimanları teknik ekiplerinden alınan görüşlere göre, havalimanı karbon salınımında görülen hata türleri, genellikle enerji kullanımı, uçuş operasyonları, araç kullanımı ve binaların enerji tüketimiyle ilgilidir. Bu hataların etkisi, karbon salınımının artması ve dolayısıyla çevreye zararlı etkilerin artmasıdır. Enerji kullanım hataları, havalimanındaki aydınlatma, ısıtma ve soğutma sistemlerinin yanlış kullanımı veya verimli olmayan ekipmanların kullanılması gibi nedenlerden kaynaklanabilir. Bu hatalar, enerji verimliliğini azaltır ve karbon salınımını artırır. Kuruluşlar, çevresel performansları sürekli olarak gözden geçirerek, karbon emisyonu süreçlerini daha iyi yönetmek için gerekli adımları atabilirler. Uçuş operasyon hataları, uçakların yakıt verimliliğinin düşük olması, uçakların fazla yakıt alması, uçuş rotalarının düşük verimlilikte olması ve uçakların motorlarının eski ve verimsiz olması gibi

nedenlerden kaynaklanabilir. Bu hatalar, uçuşların karbon salınımını artırmasıyla sonuçlanır.

Havalimanlarının karbon salınım hatalarının etkisi, çevreye zararlı etkilerin artması ve iklim değişikliğinin hızlanmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, havalimanında karbon salınımını azaltmak için enerji verimliliğini artırmak, uçuş operasyonlarını optimize etmek, araç kullanımını azaltmak ve bina enerji tüketimini azaltmak gibi tedbirlerin alınması önemlidir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapmak karbon salınımını azaltır.

Klasik HTEA analizi ve Entropi yöntemine dayalı (entropi ağırlıklarıyla çarpılan) sıralamalar Tablo 12'de şu şekilde verilmiştir. Tablodan görüleceği gibi HT12, HT19, HT16, HT11 ve HT3 klasik HTEA yönteminde ilk beş önemli hata türü olarak ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan HT2, HT10, HT13 ve HT14 son sıralarda yer alan HTEA faktörleri olarak ortaya çıkmıştır. Entropi yöntemine dayanan ağırlıklandırmada ise HT16, HT12, HT13, HT18 ve HT8 ilk beş önemli hata türü olarak değerlendirilmiş diğer taraftan HT1, HT10, HT2, HT13 ve HT14 son sıralarda yer alan HTEA faktörleri olarak ortaya çıkmaktadır.

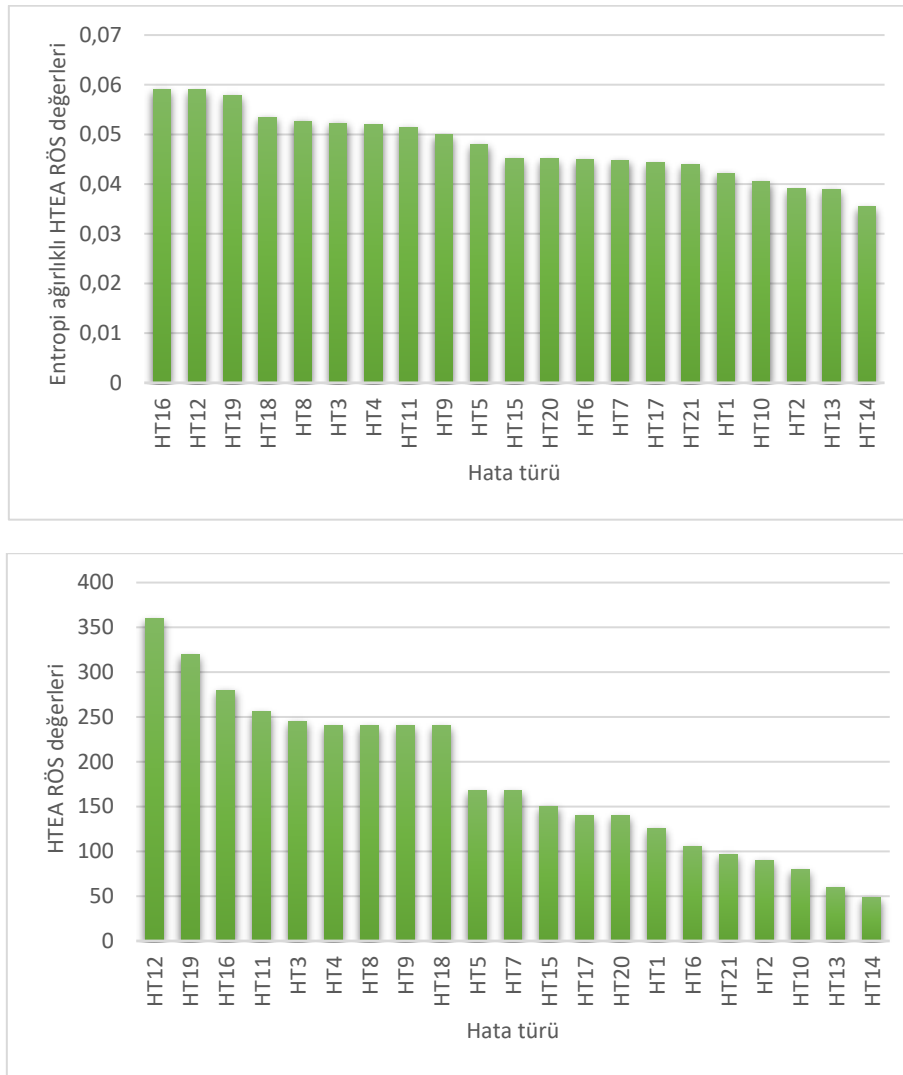
Yöntem sonuçları karşılaştırıldığında benzer sıralamalar elde edilmiştir. Her iki sonuçta da HT13 ve HT14 sonda yer alan en az önemli risk faktörleridir. HT12, HT19 ve HT16 her iki yöntemde de ilk üç sıralamada yer alan en önemli risk unsurudur.

Tablo 12. Klasik HTEA ve Entropi yöntemi

Klasik HTEA		Entropi metodu	
	Rank		Rank
HT12	1	HT 16	1
HT19	2	HT 12	2
HT16	3	HT 19	3
HT11	4	HT 18	4
HT3	5	HT 8	5
HT4	6	HT 3	6
HT8	7	HT 4	7
HT9	8	HT 11	8
HT18	9	HT 9	9
HT5	10	HT 5	10
HT7	11	HT 15	11

HT15	12	HT 20	12
HT17	13	HT 6	13
HT20	14	HT 7	14
HT1	15	HT 17	15
HT6	16	HT 21	16
HT21	17	HT 1	17
HT2	18	HT 10	18
HT10	19	HT 2	19
HT13	20	HT 13	20
HT14	21	HT 14	21

Şekil 2’de HT’lerin önem sıralaması verilmiştir.



Şekil 2. Hata türlerinin önem sıralaması

Buna göre, özellikle hangi türde hatanın daha öncelikli olduğu ve o konuda yatırım ve iyileştirme çalışmalarına ağırlık verilmesi gerektiği sonucuna ulaşılabilir. Hata türü sıralamaları değerlendirildiğinde ilk üç önem sırasında yer alan HT16, HT19, HT 12’ nin personel ve

teknoloji kaynaklı hatalar olduğu değerlendirilebilir. Dolayısıyla havaalanı işletmelerinin ilgili bakım yönetim faaliyetlerinde öncelikle bu hususlara yatırım yapılacağı sonucu çıkmaktadır. Son sırada yer alan HT 13 ve HT 14’ün ise donanımsal kaynaklı hatalar olarak

kategorize edildiği bu konulara yönelik hataların nadiren ortaya çıktığı dolayısıyla donanımsal faktörlerin daha az önem derecesinde değerlendirilmesi gerekmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre özellikle dikkate alınması gereken hata türlerinin HT12, HT19 ve HT16 olduğu görülmektedir. Bu hata türleri HT12: Uçak sistem kalibrasyonun yapılamaması, HT16: Aynı kompartımana yüklenmesi sakıncalı tehlikeli maddelerin aynı kompartımanda taşınması, HT19: Tehlike anında yanlış müdahale veya müdahalenin geç başlaması personel ve teknolojik hata kaynaklı faktörlerdir. Buna göre havalimanı yöneticilerinin özellikle personel kaynaklı hatalarını en aza indirmek için, olaylara müdahale konusunda yetersiz kalan mürettebatın artırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik (VR) simülasyon ortamlarında eğitimlerle desteklenmesi gerektiği sonucu çıkarılmıştır. Bu sayede olaya yaşanmadan daha önce farklı senaryolarla tecrübe kazanıldığı için anlık yaşanan durumlara daha rasyonel kriz yönetim stratejileri uygulanabilmektedir. Daha az önemli sayılabilecek hata türleri ise çevresel ve donanımsal faktörlerdir. HT10: Uçak yakıt kullanımının artırılması ve verimliliğinin azalması HT2: Fazla elektrik tüketen teknolojik aletlerin kullanılması. HT13: Endüstri 4.0 faaliyetleri ile entegrasyon çalışmasının sağlanamaması HT14: Arttırılmış gerçeklik (AR) uygulamalarının uçak sistemlerine katılamaması olarak ortaya çıkmıştır.

Uçak bakım ve kontrollerinin düzenli bir periyoda göre uzman teknik ekipçe değerlendirilmesinin olası kazaların önüne geçmek konusunda ciddi bir katkı sağlayacağı ön görülmüştür. Ayrıca tehlikeli madde taşımacılık talimatlarının uygulanması ve yeniden tazeleme eğitimleri ile personelin tepkimeye girebilecek, yangına veya patlamaya sebep olacak maddeleri bir arada aynı kompartımanda bulundurmaması bilgisine göre tehlikeli madde taşımacılık yönergelerine birebir uyulmasının risk yönetiminde önemli olduğu sonucu çıkarılmaktadır.

Uygulanan yöntem sonuçlarına göre süreç yönetiminde bütüncül bir yaklaşımla çözüm yaklaşımları sürdürülebilir çerçeveden sunulmaktadır. Çözümler anlık tek seferlik ortaya çıkan sorunları gidermeye yönelik değil, uzun vadeli durum analizleri ve kalıcı çözüm yaklaşımları içermesi bakımından kayıpların en aza indirgenmesi açısından düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir karar mekanizması sunmaktadır. Literatür araştırmalarına göre ve bu çalışmanın uygulama kısmında elde edilen sonuçlara göre HTEA analizinin en büyük eksikliği subjektif bir yapı sergilemesi uzman görüşlerine bağlılığı ve atanan RÖS değerlerine olan hassasiyet seviyesidir. Örneğin olasılık değeri 5 sıklık 7 ve şiddet 9 olduğunda elde edilen RÖS değeri ile olasılık değeri 7 sıklık 9 ve şiddet

5 olduğunda da aynı sonuç sunulmaktadır. Ancak dikkat edilmesi gereken husus RÖS parametrelerinin ayrı ayrı değerlendirilerek hata türü risk analizini doğru ve sağlıklı biçimde yapılmasının gerekliliğidir.

HTEA yöntemi, kalitenin devam etmesi sorun ortaya çıkmadan önlenmesi ve sürecin iyileştirilmesi açısından büyük katkı sunmaktadır. Ancak literatürde yöntemin bazı eksiklikleri olduğundan bahsedilmektedir. Bunlar kısaca şu şekilde ifade edilebilir. RÖS değerinin hesabında uzman görüşlerine bağlı olunması nedeniyle tam bir standart yoktur. Uygulanan sektöre, uygulamayı yapan işletmeye göre şiddet, olasılık ve saptanabilirlik skorları değişiklik gösterebilir. Diğer bir eksiklik aynı RÖS değerini farklı risk faktörü ağırlıklarıyla elde edilebileceği dolayısıyla hangisinin daha önemli hata türü olarak ortaya çıktığı kısmındaki belirsizliktir. Diğer bir eksik nokta ise risk faktörlerinin numerik veriye dönüştürmede yaşanan yetersizliktir. Ayrıca RÖS'ü belirleyen faktörlerin eşit önem derecesine sahip olması da yöntemin dezavantajı olarak değerlendirilmektedir [62]. Zaten tüm eksikleri gidermek için yöntemte entegre başka yöntemler dahil edilmekte ya da bulanık yaklaşımlarla değerlendirilmekte veya faktörleri eşit önem derecesinde almak yerine farklı karar verme yöntemleriyle ağırlıkların belirlenip ardından HTEA çalışması uygulanmaktadır.

Bu çalışmada, Entropi yönteminin kullanılma nedeni, objektif bir karar verme modeli olmasıdır. Sayısal verilerle hesaplama imkânı sunmaktadır. AHP yaklaşımındaki gibi niteliksel faktörleri içermeyen ve karar vericinin subjektif yargısından uzak bir yaklaşım sunmaktadır. Bu çalışmada HTEA'nın bahsedilen eksiklikleri nedeniyle objektif biçimde ağırlık hesaplanmasına yardımcı olan daha nesnel değerlendirme imkânı sağlayan Entropi tabanlı bir yaklaşımla çalışma yürütülmüştür. Stratejik öneme sahip olan ve ufak bir arızanın veya kazanın milyonlarca dolara mal olacağı havacılık sektöründe daha düşük riskli değerlendirmelerin analitik ve sistematik çerçeveden yapılma imkânı sunulmuştur. Entropi yöntemi objektif ve niceliksel hesaplamaya dayanan bir teknik olması nedeniyle avantaj sağlamaktadır. Bu yaklaşımın da dahil edilmesi ile çalışma daha bütüncül ve tutarlı değerlendirme imkânı sunmakta ve sırf karar vericinin takdirinden ibaret olma kısmı elimine edilmektedir. Çalışmanın elde edilen hata türü karşılaştırmaları açısından değerlendirildiğinde ilk üç ve son dört sıralamanın aynı olduğu görülmektedir. Aradaki değişimler yöntemlerin çalışma mekanizmalarındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır.

Çalışma sonuçlarına göre, özellikle hangi faktörlerin daha öncelikli olması ve işletme yöneticilerinin neye öncelikte yatırım yapması gerektiği bu şekilde bir çalışmayla havaalanı bakım yönetim faaliyetlerinin

daha geniş çerçeveden ve sürdürülebilir bir yaklaşımla ele almaları gerektiği vurgulanmıştır.

VI. SONUÇ VE ÖNERİLER

Havacılık sektörü en önemli ulaştırma alanlarından biridir. Havaalanlarının stratejik lokasyonlar olması nedeniyle ortaya çıkabilecek herhangi bir hatanın ciddi maliyetlere yol açacağı ortadadır. Hem can kayıpları hem yaşanacak bazı kazalar ve bunların sonuçları ciddi bedellere ve maliyete neden olacaktır. Bu durumda yolcu emniyet ve güvenliğinde tereddüt, zamanında ulaşım problemleri, uçak rötarları ve olası arıza ve kazalar kaçınılmaz olacaktır. Hata türü etkileri analizi sayesinde olası risk faktörleri tanımlanarak bu tarz tehlikelerin önüne geçilebilecektir. Literatürde HTEA uygulamalarının pek çok konuda yapıldığı görülmekle beraber havacılık sektöründe hala ihtiyaç olduğu ve bu konuda kısıtlı çalışmanın ele alındığı dikkat çekicidir.

Bu çalışmada havalimanlarında en kritik gözlenen arıza, bakım ve onarım durumları dikkate alınarak uzman görüşlerinden yararlanılarak detaylı bir risk analizi yapılmıştır. Buna göre en önemli risk faktörlerinin uçak bakım planlama kontrol sistemlerinin doğru biçimde ayarlanması ve uçak gövde, motor ve kanat parçalarında oluşabilecek kalibrasyon ve sistematik bakım sorunları olduğu görülmüştür. Ardından tehlikeli madde taşımacılığında kaynaklı hata türlerinin ortadan kaldırılması önemli görülmektedir. İletişim kaynaklı problemlerin ve alınacak ek destek kursları faktörlerinin en az riskli faktörler olduğu anlaşılmaktadır. Sürdürülebilirlik ve yeşil enerji konuları kapsamında yakıt tasarrufu ve çevre hassasiyeti konularında da karbon emisyonunun en az olduğu koşulların oluşturulması beklenmektedir Buna göre karbon salınımı düşük olan yakıt türü, havada boşa menzil yapılması, az yakıt tüketen uçak türlerinin karbon emisyonunu düşüreceği sonucu ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada farklı uzman görüşleri dikkate alınarak önemli hata türleri tespit edilmiştir. Buna göre çevresel, teknolojik ve donanımsal faktörler altında hatalar gruplandırılabilir. HTEA yöntemini sübjektif yapısı risk derecelendirmedeki yorumu açık yapısı nedeniyle objektif bir yaklaşım olan Entropi yöntemine göre hata türleri değerlendirilmiştir. Bu çalışma sayesinde bütüncül bir yaklaşımla havaalanlarındaki risk faktörleri geniş bir çerçeveden ele alınmıştır. Hava alanı yöneticilerinin öncelikle dikkate alacağı risk unsurları bu çalışma aracılığıyla ortaya çıkartılmıştır. Çalışmanın önem derecelerine göre yapılacak iyileştirmeler veya yatırım kararları konusunda yol gösterici olması beklenmektedir.

Gelecek çalışmalar için yöntem biraz daha modifiye edilerek diğer karar verme yaklaşımlarıyla entegre çalıştırılabilir. Ya da bulanık yaklaşımlardan yararlanılarak belirsizlik faktörü altında

değerlendirilebilir. Yeni hata türleri de araştırılarak çalışmanın kapsamı genişletilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] A. A. Ekinci, “Ülke riski analizi: Türkiye ve BRIC ülkeleri üzerine ampirik bir uygulama,” *Yüksek Lisans Tezi*, 2018, Accessed: Aug. 14, 2023. [Online]. Available: <http://acikerisim.nevsehir.edu.tr/xmlui/handle/20.500.11787/802>
- [2] C. Aydın, “Sağlık kuruluşlarında risk değerlendirme ve bir üniversite hastanesinde risk azaltma çalışması,” 2010, Accessed: Aug. 14, 2023. [Online]. Available: <http://acikerisim.uludag.edu.tr/jspui/handle/11452/2098>
- [3] Claudia R. Carvalho, E. Oliveira, J. C. Pereira, and N. D. Pizzolato, “Combined application of condition-based maintenance and reliability centred maintenance using PFMEA and lean concepts - a case study,” *Int. J. Inf. Decis. Sci.*, vol. 15, no. 3, pp. 302–325, 2023, doi: 10.1504/IJIDS.2023.132825.
- [4] A. ve Toraman and B. Gökkaya, “Hata Türleri Ve Etkileri Analizi (Fmea) Ve Sağlık Alanında Uygulamaları,” *SDÜ Sağlık Yönetimi Derg.*, vol. 5, no. 1, pp. 26–39, Jul. 2023, Accessed: Aug. 14, 2023. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/en/pub/sdusyd/issue/79238/1292149>
- [5] D. Demirkıran, “Yalın üretim teknikleri ve Porsche firmasında uygulanması.” İstanbul Kültür Üniversitesi / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü / İşletme Ana Bilim Dalı, 2019. Accessed: Aug. 14, 2023. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11413/6385>
- [6] C. Wan, X. Yan, D. Zhang, Z. Qu, and Z. Yang, “An advanced fuzzy Bayesian-based FMEA approach for assessing maritime supply chain risks,” *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 125, pp. 222–240, May 2019, doi: 10.1016/J.TRE.2019.03.011.
- [7] S. Fan, E. Blanco-Davis, Z. Yang, J. Zhang, and X. Yan, “Incorporation of human factors into maritime accident analysis using a data-driven Bayesian network,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 203, p. 107070, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.RESS.2020.107070.
- [8] B. Salah, M. Alnahhal, and M. Ali, “Risk prioritization using a modified FMEA analysis in industry 4.0,” *J. Eng. Res.*, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.JER.2023.07.001.
- [9] Soltanali, H., & Ramezani, S. (2023). Smart Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) for Safety-Critical Systems in the Context of Industry 4.0. In *Advances in Reliability, Failure and Risk Analysis* (pp. 151-176). Singapore: Springer Nature Singapore.
- [10] S. Shi, H. Fei, and X. Xu, “Application of a FMEA method combining interval 2-tuple linguistic

- variables and grey relational analysis in preoperative medical service process,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 1242–1247, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.IFACOL.2019.11.368.
- [11] C. L. Chang, C. C. Wei, and Y. H. Lee, “Failure mode and effects analysis using fuzzy method and grey theory,” *Kybernetes*, vol. 28, no. 8–9, pp. 1072–1080, 1999, doi: 10.1108/03684929910300295/FULL/PDF.
- [12] Putcha, C. S., Kalia, P., Pizzano, F., Hoskins, G., Newton, C., & Kamdar, K. J. (2008). A case study on FMEA applications to system reliability studies. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 15(02), 159–166.
- [13] Filz, M. A., Langner, J. E. B., Herrmann, C., & Thiede, S. (2021). Data-driven failure mode and effect analysis (FMEA) to enhance maintenance planning. *Computers in Industry*, 129, 103451. <https://doi.org/10.1016/J.COMPIND.2021.103451>
- [14] Salah, B., Janeh, O., Bruckmann, T., & Noche, B. (2015). Improving the Performance of a New Storage and Retrieval Machine Based on a Parallel Manipulator Using FMEA Analysis. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1658–1663. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2015.06.324>
- [15] Ahn, J., Noh, Y., Park, S. H., Choi, B. I., & Chang, D. (2017). Fuzzy-based failure mode and effect analysis (FMEA) of a hybrid molten carbonate fuel cell (MCFC) and gas turbine system for marine propulsion. *Journal of Power Sources*, 364, 226–233.
- [16] Liu, H. C. (2019). *Improved FMEA methods for proactive healthcare risk analysis* (pp. 73-96). Singapore: Springer.
- [17] Mou, A. T., Uddin, M. T., & Rahman, M. H. (2023). Empirical assessment of species vulnerability for biodiversity conservation: A case study on Chalan beel of Bangladesh. *Heliyon*, 9(4).
- [18] Park, C., Kontovas, C., Yang, Z., & Chang, C. H. (2023). A BN driven FMEA approach to assess maritime cybersecurity risks. *Ocean & Coastal Management*, 235, 106480.
- [19] Price, C., & Taylor, N. (1997, July). Multiple fault diagnosis from FMEA. In *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence* (pp. 1052-1057). John Wiley & Sons Ltd.
- [20] Vinodh, S., & Santhosh, D. (2012). Application of FMEA to an automotive leaf spring manufacturing organization. *The TQM Journal*, 24(3), 260-274.
- [21] Salah, B., Alkahtani, M., & Ziout, A. (2017). Using FMEA analysis for assessing air conditioners remanufacturing processes (pp. 2431–2437). IEOM Society. <https://research.uaeu.ac.ae/en/publications/using-fmea-analysis-for-assessing-air-conditioners-remanufacturing>
- [22] Fabis-Domagala, J., Domagala, M., & Momeni, H. (2021). A Concept of Risk Prioritization in FMEA Analysis for Fluid Power Systems. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 6482, 14(20), 6482. <https://doi.org/10.3390/EN14206482>
- [23] Shafiee, M., & Dinmohammadi, F. (2014). An FMEA-Based Risk Assessment Approach for Wind Turbine Systems: A Comparative Study of Onshore and Offshore. *Energies* 2014, Vol. 7, Pages 619–642, 7(2), 619–642. <https://doi.org/10.3390/EN7020619>
- [24] Nguyen, T. L., Shu, M. H., & Hsu, B. M. (2016). Extended FMEA for Sustainable Manufacturing: An Empirical Study in the Non-Woven Fabrics Industry. *Sustainability* 2016, Vol. 8, Page 939, 8(9), 939. <https://doi.org/10.3390/SU8090939>
- [25] Gökteş, P. & Özler, C. ,”Havalimanı Karbon Akreditasyonu Süreci Uygulamalarının İyileştirilmesinde Hata Türü ve Etkileri Analizinin Kullanılması “, Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi ,2017.
- [26] S.L. Omairey S. Sampethai ,L. Hans ,C. Worall ,S. Lewis, D.Negro ,T. Settar ,E. Ferrera ,E. Blanco, J.Wighton ,L. Muijs ,S. L. Veldman ,M. Doldersum ,R. Tonnaer ,N. Jayasree, M. Kazılas, Development Of İnnovative Automated Solutions For The Assembly Of Multifunctional Thermoplastic Composite Fuselage, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021.
- [27] Elahi, B. (2022). Risk Analysis Techniques. *Safety Risk Management for Medical Devices*, 89–153. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85755-0.00014-X>
- [28] Ceylan, B. O., Karatug, Ç., Akyuz, E., Arslanoğlu, Y., & Boustras, G. (2023). A system theory (STAMP) based quantitative accident analysis model for complex engineering systems. *Safety Science*, 166, 106232. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2023.106232>
- [29] Salah, B., Alnahhal, M., & Ali, M. (2023). Risk prioritization using a modified FMEA analysis in industry 4.0. *Journal of Engineering Research*. <https://doi.org/10.1016/J.JER.2023.07.001>
- [30] Kusumasari, W., Rabung, Y. Y., Ilmi, F. M., & Ellizar, E. (2022). Assessing the safety effect through Google Maps usage: FMEA approach (Case study: Indonesia). *Case Studies on Transport Policy*, 10(3), 1917–1929. <https://doi.org/10.1016/J.CSTP.2022.08.006>
- [31] Mendes, N., Geraldo Vidal Vieira, J., & Patricia Mano, A. (2022). Risk management in aviation maintenance: A systematic literature review. *Safety Science*, 153, 105810. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2022.105810>
- [32] Chang, K. H. (2015). A novel general risk assessment method using the soft TOPSIS approach. <http://dx.doi.org/10.1080/21681015.2015.1070375>, 32(6), 408–421. <https://doi.org/10.1080/21681015.2015.1070375>

- [33] Liu, S. F., Cheng, J. H., Lee, Y. L., & Gau, F. R. (2015). A case study on FMEA-based quality improvement of packaging designs in the TFT-LCD industry. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/14783363.2015.1004308*, 27(3–4), 413–431.
- [34] Hajiagha, S. H. R., Hashemi, S. S., Mohammadi, Y., & Zavadskas, E. K. (2016). Fuzzy belief structure based VIKOR method: an application for ranking delay causes of Tehran metro system by FMEA criteria. *Vilnius Gediminas Technical University*, 31(1), 108–118. <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1068847>
- [35] Ahmadi, M., Behzadian, K., Ardeshir, A., & Kapelan, Z. (2017). Comprehensive risk management using fuzzy FMEA and MCDA techniques in highway construction projects. *Vilnius Gediminas Technical University*, 23(2), 300–310. <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1068847>
- [36] Ben Romdhane, T., Badreddine, A., & Sansa, M. (2016). A new model to implement Six Sigma in small- and medium-sized enterprises. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/00207543.2016.1249430*, 55(15), 4319–4340.
- [37] Fattahi, R., & Khalilzadeh, M. (2018). Risk evaluation using a novel hybrid method based on FMEA, extended MULTIMOORA, and AHP methods under fuzzy environment. *Safety Science*, 102, 290–300. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2017.10.018>
- [38] Nie, R. xin, Tian, Z. peng, Wang, X. kang, Wang, J. qiang, & Wang, T. li. (2018). Risk evaluation by FMEA of supercritical water gasification system using multi-granular linguistic distribution assessment. *Knowledge-Based Systems*, 162, 185–201. <https://doi.org/10.1016/J.KNOSYS.2018.05.030>
- [39] Cano-Olivos, P., Hernández-Zitlalpopoca, R., Sánchez-Partida, D., Caballero-Morales, S. O., & Martínez-Flores, J. L. (2019). Risk analysis of the supply chain of a tools manufacturer in Puebla, Mexico. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 27(4), 406–413. <https://doi.org/10.1111/1468-5973.12258>
- [40] T. Uslu, “Savunma ve Havacılık Sanayisi İçin Çok Kriterli Karar verme Temeli Yeni Bir Proses Hata Tipi Hata Türü ve Etkileri Analizi Yaklaşımının Geliştirilmesi ” Yüksek Lisans Tezi, Ankara Başkent Üniversitesi /Fen Bilimleri Enstitüsü/Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı 2020.
- [41] Liu, Y., Kong, Z., & Zhang, Q. (2018). Failure modes and effects analysis (FMEA) for the security of the supply chain system of the gas station in China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 164, 325–330. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2018.08.028>
- [42] Chiu, M. C., Chu, C. Y., & Chen, C. C. (2017). An integrated product service system modelling methodology with a case study of clothing industry. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1374570>, 56(6), 2388–2409.
- [43] Maniram Kumar, A., Rajakarunakaran, S., Pitchipoo, P., & Vimalasan, R. (2018). Fuzzy based risk prioritisation in an auto LPG dispensing station. *Safety Science*, 101, 231–247. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2017.09.011>
- [44] Arabsheybani, A., Paydar, M. M., & Safaei, A. S. (2018). An integrated fuzzy MOORA method and FMEA technique for sustainable supplier selection considering quantity discounts and supplier’s risk. *Journal of Cleaner Production*, 190, 577–591. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.04.167>
- [45] Chen, Y., Ran, Y., Wang, Z., Li, X., Yang, X., & Zhang, G. (2020). An extended MULTIMOORA method based on OWGA operator and Choquet integral for risk prioritization identification of failure modes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 91, 103605. <https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAI.2020.103605>
- [46] Liu, H. C., Wang, L. E., You, X. Y., & Wu, S. M. (2017). Failure mode and effect analysis with extended grey relational analysis method in cloud setting. <https://doi.org/10.1080/14783363.2017.1337506>, 30(7–8), 745–767.
- [47] Mentés, A. (2023). Risk analysis of on-field and on-board activities and resilience investigation of Izmir Aliaga Ship Recycling Facilities. *Ocean Engineering*, 287, 115891. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2023.115891>
- [48] Goksu, S., & Arslan, O. (2023). A quantitative dynamic risk assessment for ship operation using the fuzzy FMEA: The case of ship berthing/unberthing operation. *Ocean Engineering*, 287, 115548. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2023.115548>
- [49] Park, C., Kontovas, C., Yang, Z., & Chang, C. H. (2023). A BN driven FMEA approach to assess maritime cybersecurity risks. *Ocean & Coastal Management*, 235, 106480. <https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2023.106480>
- [50] Liu, Z., Zhao, Y., & Liu, P. (2023). An integrated FMEA framework considering expert reliability for classification and its application in aircraft power supply system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123, 106319. <https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAI.2023.106319>
- [51] You, J., Lou, S., Mao, R., & Xu, T. (2022). An improved FMEA quality risk assessment framework for enterprise data assets. *Journal of Digital Economy*, 1(3), 141–152. <https://doi.org/10.1016/J.JDEC.2022.12.001>

- [52] Üçkardeş, İ., & Ünal, D. (2012). Risk analizi ve havacılık sektöründe kaza risklerinin incelenmesi. *Ç.Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 174-181.
- [53] Ravi Sankar, N. and Prabhu, B.S. (2001), "Modified approach for prioritization of failures in a system failure mode and effects analysis", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 18 No. 3, pp. 324-336. <https://doi.org/10.1108/02656710110383737>
- [54] Yılmaz, A., Hata Türü ve Etki Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi F.B.E. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 1997.
- [55] Düzgüner, E. (2002). *Ürün geliştirme sürecinde önleyici kalite güvence: FMAE Metodu ve bu metodun bir sanayi işletmesindeki uygulaması* (Master's thesis, Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- [56] Durhan, D. (2006). Hata türü ve etkileri analizi (FMEA) ve bir uygulama. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara*.
- [57] Mirghafouri, S. H., Asadian Ardakani, F., & Azizi, F. (2014). Developing a method for risk analysis in tile and ceramic industry using failure mode and effects analysis by data envelopment analysis. *Iranian Journal of Management Studies*, 7(2), 343-363.
- [58] Ford Motor Company Limited, (1995), *Quality Criteria Process Guide*, Ford Motor Company Limited, Quality Office, Vehicle Centre 1, Dunton Research & Engineering Centre, Laindon, Revision 1.00, (Restricted) 31st July
- [59] Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis*. Quality Press.
- [60] C. E. Shannon, A mathematical theory of communication, *Bell system technical journal*, vol. 27, pp. 379-423, 1948
- [61] Karami, A. ve Johansson, R. (2014). Utilization of multi attribute decision making techniques to integrate automatic and manual ranking of options. *Journal of Information Science and Engineering*, 30, 519-534
- [62] Dale, B. G., & Shaw, P. (1990). Failure mode and effects analysis in the UK motor industry: A state-of-the-art study. *Quality and Reliability Engineering International*, 6(3), 179-188.

Doğalgaz Yakıtlı Düz Alevli Endüstriyel Brülör Tasarımı

Design of a Natural Gas Fired Industrial Flat Flame Burner

Nihat Enes TURAN¹, Ayhan ONAT², Selim HARTOMACIOĞLU²

¹YETEN Yakma ve Enerji Teknolojileri San. Tic. Ltd. Şti., İstanbul, Türkiye

²Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Öz

Dünya'da enerji tüketimi her geçen gün hızla artmaktadır. Endüstriyel yanma esnasında kullanılan yenilenemez enerji kaynaklarının (doğalgaz, fuel oil, vb. fosil yakıtların) sınırlı olması, endüstriyel tesislerin yıllık yakıt tüketimleri ve yanma sonucu açığa çıkan insan sağlığına zararlı baca gazı emisyonları göz önünde bulundurulduğunda, enerji verimliliği üzerine yapılan çalışmalar dünya çapında büyük bir önem kazanmıştır. Endüstrideki farklı yanma proseslerini gerçekleştirebilmek için çeşitli endüstriyel yakıcılar, brülörler kullanılmaktadır. Bu brülörler doğalgaz, fuel oil, dizel, LPG, COG, vb. yakıtlar ile çalışabilmektedir. Brülörler, alev şekillerine, çalışma prensiplerine, kullandıkları yakıt cinsine, vb. özelliklerine göre farklı şekilde isimlendirilir. Örneğin, yüksek hız brülörü, sıvı yakıt brülörü, rejeneratif brülör, reküperatif brülör, alevsiz brülör, düşük NOx brülörü, hidrojen brülörü, düz alevli brülör, vb. Bu çalışma ile bir düz alevli brülör tasarlanarak çeşitli modeller ve kabuller içeren hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD/CFD) yöntemleri ile ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak numerik yanma analizleri yapılmıştır. Düz alevli brülörler, brülörün oluşturduğu alevin direkt olarak mamule temas etmesinin ve pik alev sıcaklıklarının oluşmasının istenilmediği, homojen sıcaklık dağılımının arandığı uygulamalar (çelik, ısıl işlem, galvaniz, vb.) için tercih edilmektedir. Oluşturdukları alev, konvansiyonel brülörlerdeki gibi uzun ve keskin bir form yerine; daha yassı, düz bir forma sahiptir. Bu sebeple, düz alevli brülör (flat flame burner) olarak adlandırılırlar. CFD analizleri yapılarak farklı hava fazlalık kat sayılarının ve farklı yakma havası sıcaklıklarının yanma karakteristikleri üzerindeki etkisi gözlemlenmiş; fırın içerisindeki sıcaklık dağılımları, hızlar, basınçlar, vb. sonuçlar incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düz alevli brülör, Endüstriyel brülörler, Yakıt tasarrufu, Düşük NOx emisyonu, Yüksek yanma verimi, Çelik, Alüminyum, Isıl işlem, Galvaniz

Abstract

Energy consumption in the world is increasing day by day. Due to the limited non-renewable energy resources (natural gas, fuel oil, etc.) used during the industrial combustion, the annual fuel consumption of industrial facilities and dangerous flue gas emissions against the human health and nature; studies on energy efficiency and reduction of flue gas emissions have gained great importance around the world. Various industrial burners are used for different combustion processes in the industry. These burners use natural gas, fuel oil, diesel, LPG, COG, etc. as fuel source. They are categorized according to their flame shapes, working principles, used material types, fuel types, etc. For example, high velocity burners, liquid fuel burners, regenerative burners, recuperative burners, fuel oil burners, flameless burners, low NOx burners, hydrogen burners, flat flame burners, etc. In this work, a flat flame burner is designed and numerical combustion analyses of this burner are made by using Fluent CFD software. Flat flame burners are preferred for applications where the flame created by the burner is not desired to directly contact with the product, peak flame temperatures are avoided and homojen temperature distribution is needed. Such as, iron & steel, aluminum, galvanizing and heat treatment industries. These burners are called Flat Flame Burners because of their flat flame shape unlike the conventional burners which have a long and sharp flame shape instead. With the help of Fluent CFD software, the effects of different excess airs and different combustion air temperatures to the combustion characteristics are investigated and temperature distributions, velocities, pressures, etc. inside the furnace are evaluated.

Keywords: Flat flame burner, Industrial burners, Fuel saving, Low NOx emissions, High combustion efficiency, Steel, Aluminium, Heat treatment, Galvanizing

I. GİRİŞ

Günümüzde enerji, ülkelerin birbirleri arasındaki siyasi ilişkileri şekillendiren ve ülkelerin ekonomik kalkınma seviyelerini belirleyen en temel unsurlardan biridir. Birçok ülkenin dışa bağıllığı, ihtiyaç duydukları enerjiyi karşılayabilme potansiyelleriyle direkt olarak ilişkilidir. Bu enerji talebini, sahip oldukları enerji kaynaklarını değerlendirerek karşılayan ülkeler, ekonomik açıdan diğer ülkelere kıyasla daha çok geliştikleri gibi takip ettikleri politikalarla da dünya siyasetinde söz sahibi olmuşlardır. Bu durum ülkeler arası siyasi ilişkiler incelendiğinde de çok net bir şekilde görülmektedir [1].

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun 2022 yılında çıkardığı doğalgaz piyasası 2021 sektör raporu incelendiğinde ülkemizin doğalgaz ihtiyacının %99,33'ünü ithal ettiği görülmüştür. %99,33'lük ithalat oranı, doğalgaz miktarı olarak 58.703,93 milyon Sm³'e denk gelmektedir ve bu miktar 2020 yılına kıyasla %21,98 oranında artmıştır. İthalat oranı ve yıllık ihtiyaç artışı göz önünde bulundurulduğunda, kısa vadede doğalgaz tüketimindeki dışa bağımlılığımızın azaltılması mümkün gözükmemektedir [2]. Bu sebeple, doğalgaz kullanan endüstriler için, enerji verimliliğini artırma yönünde çalışmalar gerçekleştirilmelidir. Yüksek verimli yanma teknolojilerinin geliştirilmesi ve işletmeye alınması ülke ekonomisinin gelişimi için büyük önem taşımaktadır.

Pandemi sürecinde de çok net bir şekilde şahit olunmuştur ki insan sağlığı her şeyden önce gelmektedir. Endüstriyel yanma sonucu açığa çıkan baca gazı emisyonları insan sağlığını olumsuz yönde etkilediği gibi baca gazlarının atmosferde oluşturduğu sera etkisi ile meydana gelen küresel ısınma sebebiyle de doğadaki ekolojik dengeler bozulmuştur.

Yukarıda bahsi geçen konular incelendiğinde yapılacak Ar-Ge faaliyetlerine endüstriyel yakma ve ısıtma proseslerinin kalbi olan endüstriyel brülörler ile başlamak gerektiği görülür. Endüstriyel brülörler çeşitli yakıtlar yakılarak ısı enerjisinin elde edildiği endüstriyel yakma ve ısıtma proseslerinde kullanılırlar. Sanayideki çeşitli proseslere ve uygulama alanlarına göre birçok çeşitleri vardır. Bunlardan biri de düz alevli brülörlerdir.

Düz alevli brülörler, brülörün oluşturduğu alevin direkt olarak mamule temas etmesinin ve pik alev sıcaklıklarının oluşmasının istenilmediği, homojen sıcaklık dağılımının arandığı uygulamalar (çelik, ısıl işlem, galvaniz, vb.) için tercih edilmektedir. Oluşturdukları alev, konvansiyonel brülörlerdeki gibi uzun bir form yerine; daha yassı, düz bir forma sahiptir. Bu sebeple düz alevli brülör adlandırılırlar. Düz alevli brülörler ve uygulama alanları ile ilgili halihazırda birçok literatür çalışması olduğu gibi, yeni

yayınlanan yönetmelikler ve spesifik uygulamalar düşünüldüğünde yüksek verimli, düşük baca gazı emisyonlarına sahip düz alevli brülörlerin geliştirilme çalışmaları devam etmektedir [3]. Yapılan literatür çalışması ile düz alev formunu elde etmek için uygulanan değişik yöntemlere ve tasarımlara ulaşılmıştır. Bunlardan bazıları şu şekildedir.

Giraud P. ve Montgermont J. C. yaptıkları çalışmada, hadde, sıcak tutma ve ısıl işlem fırınlarında kullanılmak üzere bir düz alevli brülör geliştirmişlerdir. Tasarladıkları brülör, düz alev formunu oluşturmak için kavisli konik şekilli bir refrakter malzemeden yapılmış alev borusuna sahiptir. Hava girişine yerleştirilmiş bir orifis metrenin, brülör performansına ve brülör alev formuna olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca, yakıt-hava karışımını meydana getiren türbülantör için farklı tasarımlar yapılarak bu tasarımların brülör performansına ve yanma sonucu açığa çıkan NOx emisyonu miktarına etkisi incelenmiştir [4].

Feese J. J. ve Wartluft B. B. yaptıkları çalışmada, alüminyum ergitme ve hadde fırınlarında kullanılmak üzere bir düz alevli brülör geliştirmişlerdir. Kademeli yanma yöntemiyle çalışan bu brülör, oksidatör olarak ısıtılmış yakma havası kullanılmaktadır. Sahip olduğu geometri sayesinde yanma sonucu açığa çıkan baca gazları içerisinde çok düşük seviyelerde NOx, CO ve HC emisyonları ölçülmüştür. Bu sebeple düşük NOx brülörü olarak değerlendirilmektedir. Kullanılan kademeli yanma yöntemi ile yüksek sıcaklık uygulamalarında olduğu gibi düşük sıcaklık uygulamalarında da yüksek yanma verimi elde edilmektedir [5].

Fantuzzi M. ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, hadde fırınlarında kullanılmak üzere bir düz alevli brülör geliştirmişlerdir. Tasarladıkları brülör, düz alev formunu oluşturmak için refrakter malzemeden yapılmış konik bir alev borusuna sahiptir. Diğer düz alevli brülör tasarımlarından farklı olarak alevin içerisine sekonder gaz kanalları kullanılarak doğalgaz verilmektedir. Bu yöntemin alev formuna ve baca gazı emisyonlarına etkisini incelemişlerdir. Sekonder gaz kanallarından yanma bölgesine doğalgaz gönderilmesi ile yanmamış gazların yakılıp baca gazı emisyonlarının düşürüldüğünü tespit etmişlerdir [6].

Wünning J. G. ve Wünning J. A. yaptıkları çalışmada, ısıl işlem fırınlarında kullanılmak üzere bir düz alevli brülör geliştirmişlerdir. Tasarladıkları brülör, diğer düz alevli brülör tasarımlarından farklı olarak konik alev borusu yerine düz alev formunu oluşturacak özel tasarlanmış bir silisyum karbür alev borusuna sahiptir. Brülör, elde ettiği düz alev formu ile yüksek hızlı yanma gerçekleştirir ve fırın iç atmosferini sirküle ettirir. Bu sayede fırın içerisindeki yanmamış gazlar tekrar reaksiyon bölgesine çekilir ve yakılır.

Yanmamış gazların yakılması ile baca gazı emisyonları düşürülür [7].

Wicker M. yaptığı çalışmada, bir düz alevli brülör geliştirmiştir. Tasarlanan brülör, klasik bir türbülátöre sahiptir. Türbülátör üzerindeki havayı döndüren dış kanatlar, düz alev formu için gerekli türbülans sağlayacak şekilde imal edilmiştir. Yakıt, türbülátörün merkezinden geçerek hava ile buluşur ve yanma reaksiyonu başlar. Ayrıca, brülörün merkezinden fırın atmosferine doğru uzatılmış bir gaz lansı kullanılarak yakıtın birden fazla noktada hava ile buluşması sağlanır ve kademeli yanma gerçekleştirilmiş olur. Bu sayede baca gazı emisyonları düşürülmüş ve fırın içerisindeki pik sıcaklıkların önüne geçilmiştir [8].

II. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Brülör ve Yanma Odası Tasarımı

Düz alevli brülörler ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde düz alev formunu elde etmek için alev borusunun konik bir şekilde tasarlandığı görülmüştür. Yaptığımız çalışmada da düz alev formunu elde etmek için alev borusu konik şekilde tasarlanmıştır. Yanma yöntemi olarak kademeli yanma metodu tercih edilmiştir. Bunun sebebi, kademeli yanma sonucunda açığa çıkan baca gazı emisyonlarının standart yanma sonucu açığa çıkan baca gazı emisyonlarından daha az olması ve daha verimli bir yanmanın elde edilmesidir. Yakıt ve hava, çeşitli geometrilerden geçerek brülör gövdesi içerisinde birçok kez karışır ve yanma meydana gelir.

Oluşan karışımın yüksek alev çıkış hızları ile konik alev borusuna yönlendirilmesi ile düz alev formu elde edilir. Bu sayede alev direkt olarak mamule temas etmez ve ışıınım yoluyla ısı transferi gerçekleşir. Ayrıca, düz alevin fırın duvarlarına doğru yönelmesi ile fırın duvarları ısınır. Isınan duvarların yaptığı ışıma ile de bir miktar ısı enerjisi mamule aktarılır.

Brülör tasarımı için kapasite 70 kW olarak seçilmiştir ve aşağıdaki formüller kullanılarak sisteme girecek akışkanların debileri hesaplanmıştır.

$$Q_{Brülör} = H_{U, Metan} \times \dot{V}_{Metan} \quad (1)$$

$$\rho_{Metan} = \dot{m}_{Metan} \div \dot{V}_{Metan} \quad (2)$$

$$\dot{V}_{Hava} = \lambda \times \dot{L}_{min} \times \dot{V}_{Metan} \quad (3)$$

$$\rho_{Hava} = \dot{m}_{Hava} \div \dot{V}_{Hava} \quad (4)$$

$Q_{Brülör}$: Brülör kapasitesi

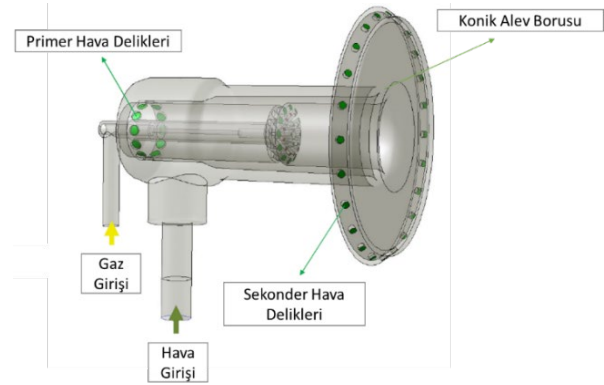
H_U : Alt ısıl değer

\dot{V} : Hacimsel debi

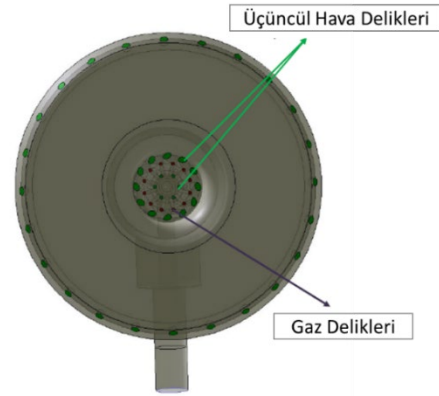
ρ : Yoğunluk

\dot{m} : Kütleli debi

Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de tasarlanan brülör geometrisi verilmiştir.

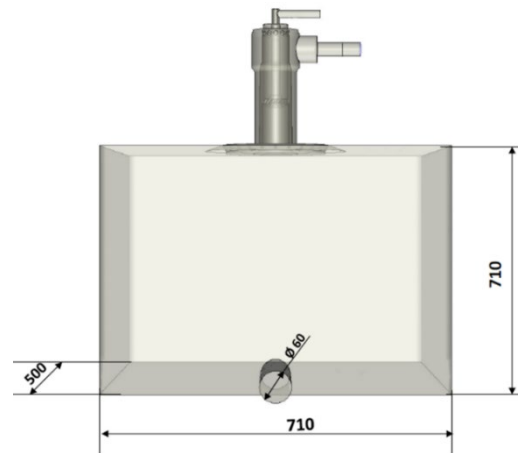


Şekil 2.1 Brülör Geometrisi - Yandan Görünüş



Şekil 2.2 Brülör Geometrisi - Önden Görünüş

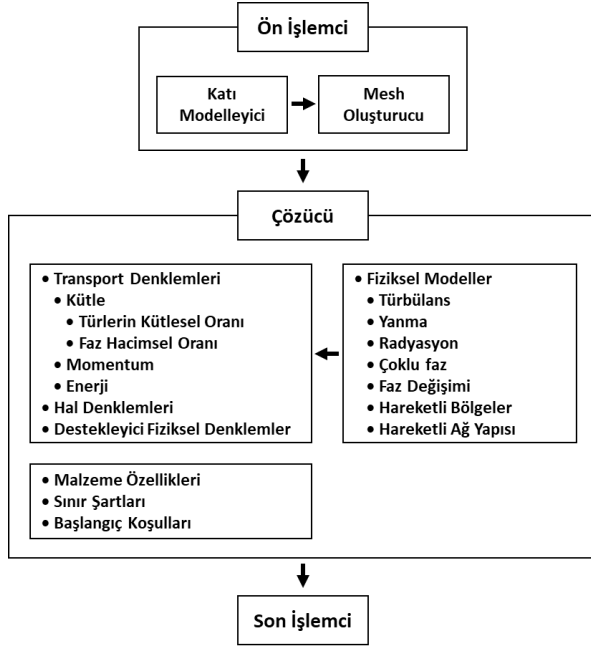
Şekil 2.3’te brülörün yanma odasına monte edilmiş hali verilmiştir.



Şekil 2.3 Yanma Odası - Önden Görünüş

2.1. Brülör ve Yanma Odası Tasarımı

Yanma analizi için kullanılan ANSYS FLUENT yazılımında kısmi diferansiyel denklemleri cebirsel denklemlere dönüştürmek için sonlu hacimler metodu kullanılmaktadır. FLUENT yazılımı, muhtelif modelleme programlarından aldığı Mesh dosyalarını okuyup istenilen koşulları uygulamak için dizayn edilmiştir ve bu sayede sistemin çözümünü elde eder. FLUENT yazılımını oluşturan ön işlemci, çözücü ve son işlemci kısımları Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 ANSYS FLUENT Yazılımını Oluşturan Kısımlar [9]

2.3. Analiz Formülleri

CFD hesaplamaları için aşağıdaki denklemler dikkate alınır [10].

Kütlenin korunumu denklemi:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (5)$$

Momentumun korunumu denklemi:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (6)$$

Enerjinin korunumu denklemi:

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \Phi \quad (7)$$

2.4. Kullanılan Modeller

Reynolds sayıları hesaplanarak yanma analizi için kullanılacak metan (yakıt) ve havanın (oksidatör) türbülanslı akış bölgesinde olduğu tespit edilmiştir.

$$Re = \frac{\text{Atalet Kuvvetleri}}{\text{Viskoz Kuvvetleri}} = u \times D \div \nu \quad (8)$$

Re : Reynolds Sayısı

u : Akışkan Hızı

D : Çap

ν : Kinematik Viskozite

Türbülans modeli olarak standart k- ϵ , radyasyon modeli olarak discrete ordinates ve kimyasal reaksiyon modeli olarak reaksiyona giren gazları belirleme seçeneğini sunması sebebiyle species transport modeli seçilmiştir.

2.5. Mesh

Oluşturulan geometri ANSYS FLUENT programında Mesh modülüne aktarılmış ve sonlu elemanlar kullanılarak geometri bir ağ haline getirilmiştir. Şekil 2.4'te brülöre ait Mesh verilmiştir.



Şekil 2.5 Brülöre Ait Mesh

III. SONUÇLAR VE BULGULAR

3.1. Değişken Hava Fazlalıkları ile Yapılan Analizler

2. bölümde akışkanların debileri hesaplanırken hava fazlalık katsayısı (λ) 1,25 olarak alınmıştır. Değişken hava fazlalıklarının analiz sonucuna etkilerini incelemek için aşağıdaki tabloda belirtilen λ değerleri kullanılarak hava debileri tekrar hesaplanmıştır. Tablo 3.1 ve tablo 3.2'de yapılan 4 farklı yanma analizine ait girdiler ve hesaplanan değerler verilmiştir.

Tablo 3.1 Girdiler

GİRDİLER				
	Analiz-1	Analiz-2	Analiz-3	Analiz-4
Brülör Kapasitesi (kW)	70	70	70	70
Yakıt	Metan	Metan	Metan	Metan
Oksidatör	Hava	Hava	Hava	Hava
Yakıt Sıcaklığı (°C)	25	25	25	25
Hava Sıcaklığı (°C)	25	25	25	25

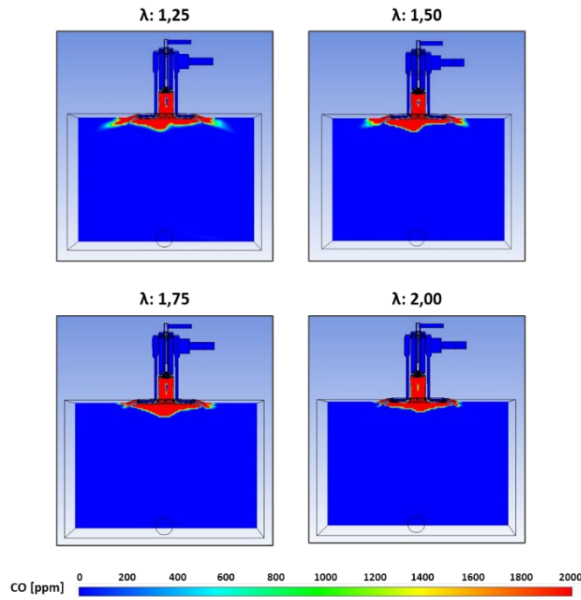
Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	1,25	1,50	1,75	2,00
---------------------------------------	------	------	------	------

Tablo 3.2 Hesaplanan Değerler

HESAPLANAN DEĞERLER				
	Analiz - 1	Analiz - 2	Analiz - 3	Analiz - 4
Metan Debisi (kg/s)	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014
Hava Debisi (kg/s)	0,0305	0,0366	0,0427	0,0488

3.1.1. Alev Formu

Şekil 3.1’de yapılan analiz sonuçlarına göre farklı hava fazlalıkları ile meydana gelen yanmada elde edilen alev formları gösterilmiştir.

**Şekil 3.1** Analiz Sonuçlarına Göre Alev Formları

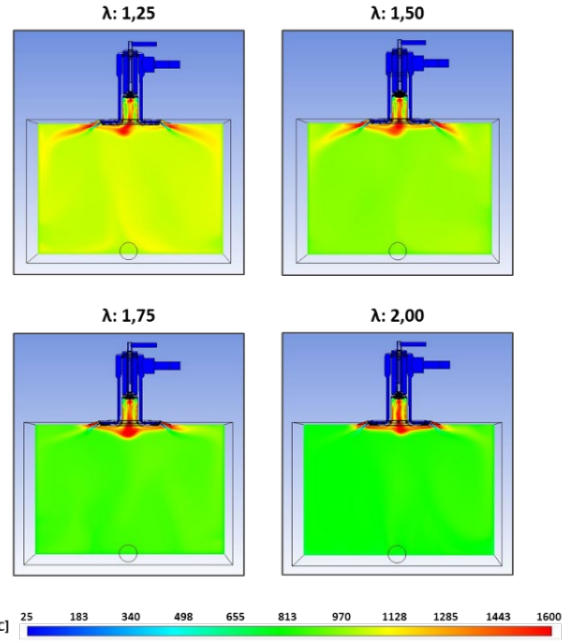
Hava fazlalığının alev formu üzerindeki etkisi incelendiğinde, yakıt debisi sabitken hava debisi artırıldığında alev boyunun kısaldığı ve alevin brülörün merkezine doğru çekildiği görülmüştür. Tablo 3.3’te hava fazlalığındaki değişimin alev boyuna etkisi verilmiştir.

Tablo 3.3 Hava Fazlalığının Alev Boyuna Etkisi

Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	1,25	1,50	1,75	2,00
Alev Boyu (cm)	41	33	30	25

3.1.2. Sıcaklık Dağılımı

Şekil 3.2’de yapılan analiz sonuçlarına göre farklı hava fazlalıkları ile meydana gelen yanmada elde edilen sıcaklık dağılımları [°C] cinsinden gösterilmiştir.

**Şekil 3.2** Analiz Sonuçlarına Göre Alev Formları

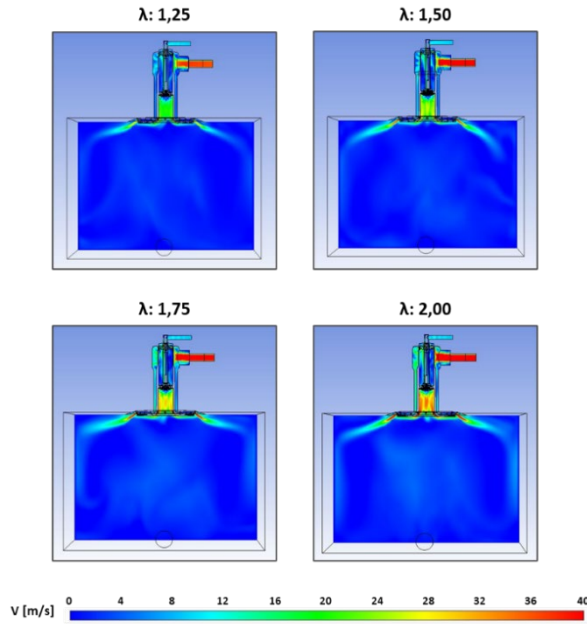
Hava fazlalığının adyabatik alev sıcaklığı ve baca sıcaklığı üzerindeki etkisi incelendiğinde hava debisi arttıkça adyabatik alev sıcaklığının ve baca sıcaklığının düştüğü görülmüştür. Tablo 3.4’te hava fazlalığındaki değişimin adyabatik alev sıcaklığına ve baca sıcaklığına etkisi verilmiştir.

Tablo 3.4 Hava Fazlalığının Adyabatik Alev Sıcaklığına ve Baca Sıcaklığına Etkisi

Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	1,25	1,50	1,75	2,00
Adyabatik Alev Sıcaklığı (°C)	1780	1650	1600	1550
Baca Sıcaklığı (°C)	1080	980	890	750

3.1.3. Hız Dağılımı

Şekil 3.3’te yapılan analiz sonuçlarına göre farklı hava fazlalıkları ile meydana gelen yanmada elde edilen hız dağılımları [m/s] cinsinde gösterilmiştir.



Şekil 3.3 [m/s] Cinsinden Hız Dağılımları

Hava fazlalığının fırın içerisindeki hız dağılımları üzerindeki etkisi incelendiğinde hava debisi arttıkça alev çıkış hızının arttığı görülmüştür. Tablo 3.5'te hava fazlalığındaki değişimin alev çıkış hızına etkisi verilmiştir.

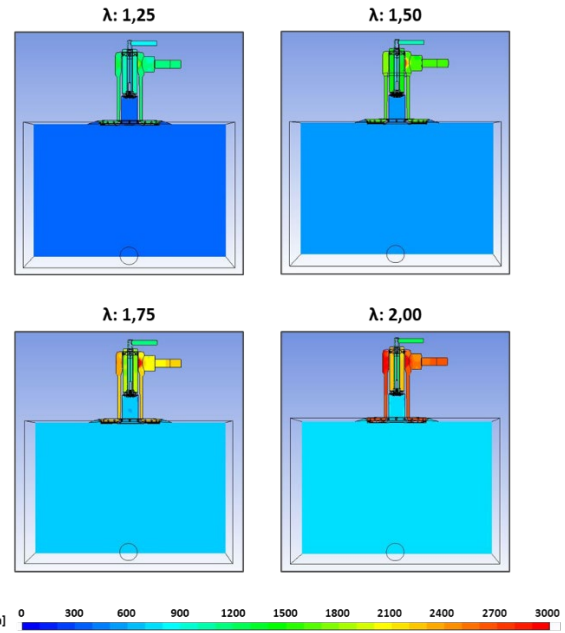
Tablo 3.5 Hava Fazlalığının Alev Çıkış Hızına Etkisi

Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	1,25	1,50	1,75	2,00
Alev Çıkış Hızı (m/s)	32	39	45	52

Hava fazlalığının fırın içerisindeki hız dağılımları üzerindeki etkisi incelendiğinde hava debisi ve alev çıkış hızları arttıkça, hız vektörlerinin fırının iç kısımlarına doğru daha geniş bir alana yayıldıkları görülmüştür. Alev çıkış hızının artması sonucunda fırın iç atmosferi sirküle ettirilir ve fırın içerisindeki yanmamış gazlar tekrardan reaksiyon bölgesine çekilerek yakılır. Yanmamış gazların yakılması ile NO_x emisyonları düşürülmüş olur. Bu da yüksek hızlı yanmanın endüstriyel uygulamalarda NO_x emisyonlarını düşürmek amacıyla kullanılmasının sebeplerinden biridir.

3.1.4. Basınç Dağılımı

Şekil 3.4'te yapılan analiz sonuçlarına göre farklı hava fazlalıkları ile meydana gelen yanmada elde edilen basınç dağılımları [Pa] cinsinde gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Analiz Sonuçlarına Göre Basınç Dağılımları
Hava fazlalığının fırın içerisindeki basınç dağılımına etkisi incelendiğinde hava debisi ve alev çıkış hızları arttıkça fırın iç basıncının arttığı, bu durumun da brülör gaz ve hava giriş basınçlarını etkilediği görülmüştür. Hava fazlalığı arttıkça brülör gaz ve hava giriş basınçları da artmıştır. Tablo 3.6'da hava fazlalığındaki değişimin brülör gaz ve hava giriş basınçlarına etkisi verilmiştir.

Tablo 3.6 Hava Fazlalığının Brülör Gaz ve Hava Giriş Basınçlarına Etkisi

Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	1,25	1,50	1,75	2,00
Gaz Giriş Basıncı (Pa)	940	1100	1200	1300
Hava Giriş Basıncı (Pa)	1130	1660	2250	2700

3.2. Değişken Yakma Havası Sıcaklıkları ile Yapılan Analizler

Değişken yakma havası sıcaklıklarının analiz sonucuna etkilerini incelemek için aşağıdaki tabloda belirtilen hava sıcaklık değerleri ile yanma analizleri tekrar yapılmıştır. Tablo 3.7 ve tablo 3.8'de yapılan 4 farklı yanma analizine ait girdiler ve hesaplanan değerler verilmiştir.

Tablo 3.7 Girdiler

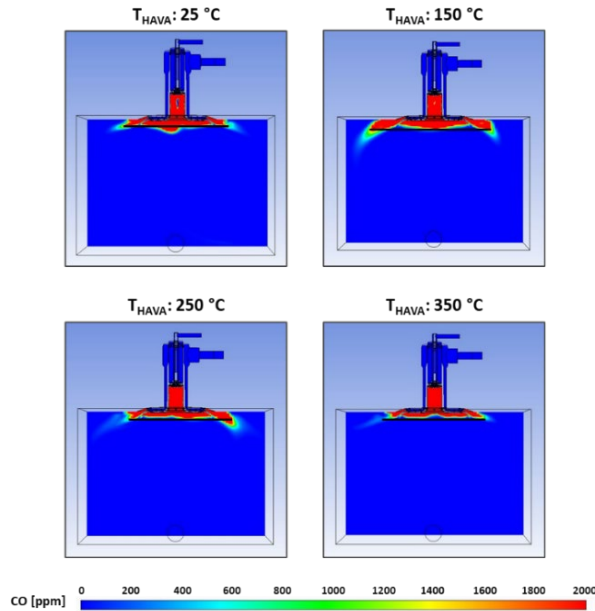
GİRDİLER				
	Analiz-1	Analiz-2	Analiz-3	Analiz-4
Brülör Kapasitesi (kW)	70	70	70	70
Yakıt	Metan	Metan	Metan	Metan
Oksidatör	Hava	Hava	Hava	Hava
Yakıt Sıcaklığı (°C)	25	25	25	25
Hava Sıcaklığı (°C)	25	150	250	350
Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	1,25	1,25	1,25	1,25

Tablo 3.8 Hesaplanan Değerler

HESAPLANAN DEĞERLER				
	Analiz - 1	Analiz - 2	Analiz - 3	Analiz - 4
Metan Debisi (kg/s)	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014
Hava Debisi (kg/s)	0,0305	0,0305	0,0305	0,0305

3.2.1. Alev Formu

Şekil 3.5'te yapılan analiz sonuçlarına göre farklı yakma havası sıcaklıkları ile meydana gelen yanmada elde edilen alev formları gösterilmiştir.

**Şekil 3.5** Analiz Sonuçlarına Göre Alev Formları

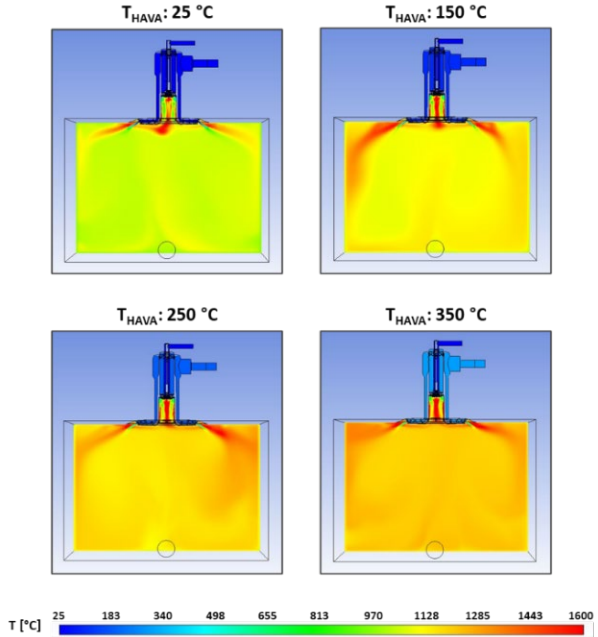
Yakma havası sıcaklığının alev formu üzerindeki etkisi incelendiğinde, yakma havası sıcaklığı arttırıldığında alev boyunun küçüldüğü ve alevin merkeze doğru çekildiği görülmüştür. Tablo 3.9'da yakma havası sıcaklığındaki değişimin alev boyuna etkisi verilmiştir.

Tablo 3.9 Yakma Havası Sıcaklığının Alev Boyuna Etkisi

Yakma Havası Sıcaklığı (°C)	1,25	1,50	1,75	2,00
Alev Boyu (cm)	41	33	30	25

3.2.2. Sıcaklık Dağılımı

Şekil 3.6'da yapılan analiz sonuçlarına göre farklı yakma havası sıcaklıkları ile meydana gelen yanmada elde edilen sıcaklık dağılımları [°C] cinsinden gösterilmiştir.

**Şekil 3.6** [°C] Cinsinden Sıcaklık Dağılımları

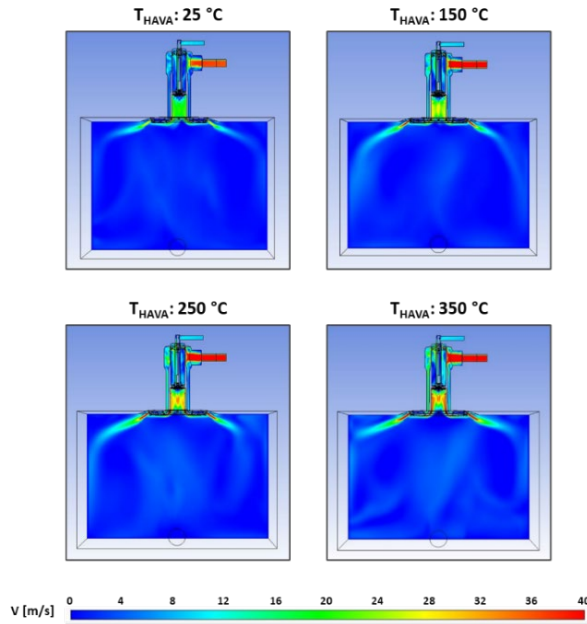
Yakma havası sıcaklığının adyabatik alev sıcaklığı ve baca sıcaklığı üzerindeki etkisi incelendiğinde yakma havası sıcaklığı arttıkça adyabatik alev sıcaklığının ve baca sıcaklığının arttığı görülmüştür. Tablo 3.10'da yakma havası sıcaklığındaki değişimin adyabatik alev sıcaklığına ve baca sıcaklığına etkisi verilmiştir.

Tablo 3.10 Yakma Havası Sıcaklığının Adyabatik Alev Sıcaklığına ve Baca Sıcaklığına Etkisi

Yakma Havası Sıcaklığı (°C)	25	150	250	350
Adyabatik Alev Sıcaklığı (°C)	1780	1890	1950	1980
Baca Sıcaklığı (°C)	1080	1150	1240	1290

3.2.3. Hız Dağılımı

Şekil 3.7'de yapılan analiz sonuçlarına göre farklı yakma havası sıcaklıkları ile meydana gelen yanmada elde edilen hız dağılımları [m/s] cinsinde gösterilmiştir.



Şekil 3.7 [m/s] Cinsinden Hız Dağılımları

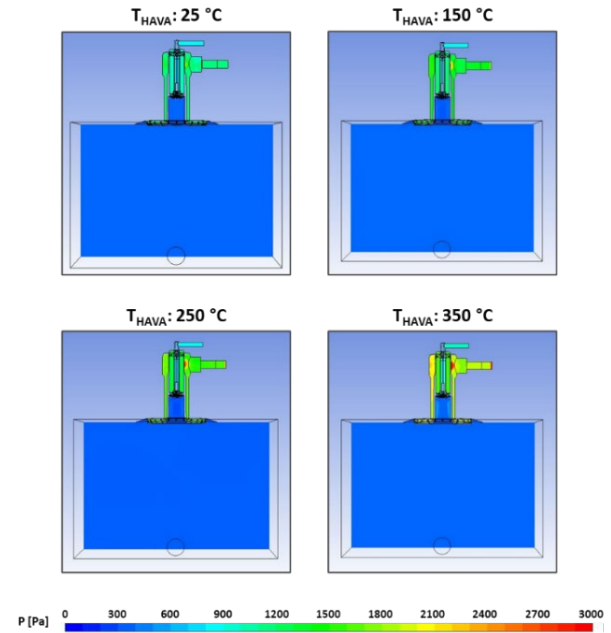
Yakma havası sıcaklığının fırın içerisindeki hız dağılımları üzerindeki etkisi incelendiğinde yakma havası sıcaklığı arttıkça alev çıkış hızının arttığı görülmüştür. Tablo 3.11'de yakma havası sıcaklığındaki değişimin alev çıkış hızına etkisi verilmiştir.

Tablo 3.11 Yakma Havası Sıcaklığının Alev Çıkış Hızına Etkisi

Yakma Havası Sıcaklığı (°C)	25	150	250	350
Alev Çıkış Hızı (m/s)	32	48	56	68

3.2.4. Basınç Dağılımı

Şekil 3.8'de yapılan analiz sonuçlarına göre farklı yakma havası sıcaklıkları ile meydana gelen yanmada elde edilen basınç dağılımları [Pa] cinsinde gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Analiz Sonuçlarına Göre Basınç Dağılımları

Yakma havası sıcaklığının fırın içerisindeki basınç dağılımına etkisi incelendiğinde yakma havası sıcaklığı ve alev çıkış hızları arttıkça brülör gaz ve hava giriş basınçlarının arttığı görülmüştür. Tablo 3.11'de yakma havası sıcaklığındaki değişimin brülör gaz ve hava giriş basınçlarına etkisi verilmiştir.

Tablo 3.10 Yakma Havası Sıcaklığının Brülör Gaz ve Hava Giriş Basınçlarına Etkisi

Yakma Havası Sıcaklığı (°C)	25	150	250	350
Gaz Giriş Basıncı (Pa)	940	980	1020	1080
Hava Giriş Basıncı (Pa)	1130	2100	2800	3600

IV. SONUÇ

Yapılan analizler sonucunda düz alev formunun doğrudan brülör geometrisi ile alakalı olduğu, hava fazlalık kat sayısı ve yakma hava sıcaklığında meydana gelen değişikliklerin yanmayı nasıl etkilediği açıkça görülmüştür. Bu parametrelerin alev formu, sıcaklık dağılımları, hızlar, basınçlar, vb. üzerinde yapmış olduğu değişikliklerin incelenmesi makale konusu brülörün değişik sektörlerde uygulanması için önemli bir referanstır.

CFD yazılımlarının brülör imalatı yapan firmalar için vazgeçilmez bir araç olduğu açıkça görülmüştür. CFD analizleri yapılarak endüstrideki yanma uygulamaları esnasında karşılaşılabilecek sorunların daha tasarım aşamasında tespit edilmesi ve incelenmesi mümkün hale gelmiştir.

CFD analiz sonuçları, yapılacak prototip imalatı çalışmalarına referans olmuştur. İmal edilecek

prototipin bir yanma odasında performans testlerinin yapılması ve performans test sonuçları ile CFD analiz sonuçlarının karşılaştırılması hedeflenmektedir.

Performans testleri esnasında, CFD analiz sonuçlarına ek olarak, baca gazı içerisindeki NO_x, CO, CO₂ ve O₂ gibi yanma sonucu açığa çıkan gazların miktarları da ölçülecektir.

Gelecekte yapılması planlanan bu çalışmalar ile ısı işlem, çelik, galvaniz, vb. sektörler için yüksek verimli, düşük NO_x emisyonuna sahip düz alevli brülörün seri imalatı planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] İskender, S. (2005). Türkiye 'de ve Dünya 'da Enerji & Nükleer Enerji Gerçeği, Türkiye Teknik Elemanlar Vakfı, Ankara.
- [2] T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (2022). Doğal Gaz Piyasası 2021 Yılı Sektör Raporu, Ankara.
- [3] Leicher, J. (2015). Effiziente Brennertechnik für Industrieöfen, 6. Praxistagung, Essen.
- [4] Giraud, P., Montgermont, J. C. (2002). Flat Flame Burners, US Patent 6,461,145 B1.
- [5] Feese, J. J., Wartluft, B. A. (2013). Three Stage Low NO_x Burner System with Controlled Stage Air Separation, US Patent 8,485,813 B2.
- [6] Fantuzzi, M., Daneri, M., Laviosa, V., Senarega, M., Zanusso, U., Malfa, E. (2013). Flat-Flame Vault Burner with Low Polluting Emissions, US Patent 8,480,394 B2.
- [7] Wüning, J. G., Wüning, J. A. (2004). Flameless Oxidation Burner, US Patent 2004/0091830 A1.
- [8] Wicker, M. (2012). Low-NO_x-Lösungen für Industrielle Brenner, 3. Praxistagung, Essen.
- [9] Omar, M., Yoğuşmalı Kombiler için Çok Geçişli Kompakt Isı Değiştiricisi ve Yarı Küresel Metal Matrix Yakıcının Geliştirilmesi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2014.
- [10] Çengel, Y.A. (2006). Heat and Mass Transfer A Practical Approach, 3rd Edition Mc-Graw-Hill, Singapore.

Ayçiçeği Kabuğu Takviyeli Biyo-Epoksi Matrisli Çevreci ve Maliyet Etkin Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Mekanik Karakterizasyonu

Development and Mechanical Characterization of Environmentally Friendly and Cost-Effective Composites with Sunflower Husk Reinforced Bio-Epoxy Matrix

Asya Nur SUNMAZ¹, Ulaş DOĞAN¹, Alaeddin Burak IREZ¹

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), Makina Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

Öz

İklim değişikliği, azalan kaynaklar ve artan hammadde maliyetleri, endüstriyi daha sürdürülebilir, uygun maliyetli ve hafif malzemeler yaratmaya itmiştir. Doğal elyaf takviyeli kompozitler bu bağlamda çelik gibi mevcut geleneksel malzemelerin yerine kullanılacak alternatiflerdir. Ayçiçeği kabuğu (SH), diğer birçok doğal elyafın yanı sıra, tarımsal atık olarak kolayca erişilebilir ve avantajlı malzeme özelliklerine sahiptir. Bu çalışmada, biyo-epoksi matrisi ile ayçiçeği kabukları, toz haline getirildikten sonra karıştırılarak kompozitler imal edilmiş ve sonrasında mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Ayrıca, ayçiçeği kabuklarının NaOH ile yüzey işlemine tabi tutulmasının mekanik performansa etkisi de bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, SH takviyesi kompozitlerin çekme dayanımını ve kopma uzamasını düşürürken, elastisite modülünü arttırmıştır. Dolgu elemanı olan ayçiçeği kabuğunun NaOH ile muamele edilmesi mekanik özelliklerde iyileşme sağlamıştır. Mekanik özellik tespiti adına gerçekleştirilen çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiş ve NaOH ile yüzey işlemine tabi tutulmamış olan numunelerde matris elyaf ara yüzey problemleri gözlemlenmiştir. Ayrıca liflerin dekohezyonu da ayrı bir hasar mekanizması olarak karşımıza çıkmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, bu tip çevreci ve maliyet etkin kompozitler otomotiv sektöründe yapısal olmayan, parçaların üretiminde önemli tercih potansiyeli sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik, Doğal elyaf takviyeli kompozitler, Biyo-bozunabilir malzemeler, Hasar mekanizmaları

Abstract

Climate change, dwindling resources and rising raw material costs have pushed the industry to create more sustainable, cost-effective and lightweight materials. In this context, natural fiber composites are alternatives that can be used instead of existing traditional materials such as steel. Sunflower husk (SH), along with many other natural fibers, is easily accessible as agricultural waste and has advantageous material properties. In this study, composites were manufactured by mixing bio-epoxy matrix and sunflower husks after being grinded into powder, and then their mechanical properties were determined. Additionally, the effect of surface treatment of sunflower husks with NaOH on mechanical performance was also examined within the scope of this study. According to the results, SH reinforcement decreased the tensile strength and elongation at break of the composites, while increasing the elasticity modulus. Treating the sunflower husk, which serves as the filler component, with NaOH has improved the mechanical properties. After conducting the tensile tests in order to determine the mechanical properties, the fractured surfaces were examined using scanning electron microscopy, revealing matrix-fiber interface issues in the samples that were not subjected to NaOH surface treatment. In addition, decohesion of fibers emerged as a separate damage mechanism. When the results are evaluated, this type of environmentally friendly and cost-effective composites can be preferred in the production of non-structural parts in the automotive industry.

Keywords: Sustainability, Natural fiber reinforced composites, Biodegradable materials, Failure mechanisms

I. GİRİŞ

Günümüz dünyasının en önemli problemlerinden birisi küresel iklim değişikliğidir ve bu probleme çözüm olarak Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerini yayımlamıştır. Bu hedefler, iklim değişikliğini acil olarak ele alma ve dünyamız için ortak bir eylem planı oluşturmayı amaçlamaktadır [1]. Bu eylem planının imalat sektörü ayağındaki iki temel aksiyon eko-dönüşüm ve mevcut sistemlerin, komponentlerin hafifletilmesidir. Sürdürülebilir, uygun maliyetli ve toksik olmayan alternatif malzemelerin mevcut sistemlere entegrasyonu, eko-dönüşümün temel yol haritasıdır. Öte yandan hafifletme ise toplam kütlenin azaltılıp enerji tüketimini düşürerek daha verimli sistemler geliştirilmesine olanak sağlar [2, 3]. Hafifletmenin önemini

vurgulamak için, ortalama bir aracın ağırlığında 100 kilogramlık bir azalmanın, yakıt tüketiminde 100 kilometrede yaklaşık 0,4 litrelik bir azalmaya ve CO₂ emisyonlarında kilometre başına yaklaşık 10 gramlık bir düşüşe imkân sağladığını belirtmek gerekir [4]. Hafifletmede temelde iki temel strateji izlenmektedir. Bunlardan birincisi, bileşenin belirli bölgesindeki yük taşımayan unsurların kaldırıldığı bir tasarım güncellenmesi iken ikinci yöntem ise çelik gibi ağır malzemelerin yerine daha hafif alternatif malzemelerin kullanılmasıdır [5]. Otomotiv ve havacılık endüstrilerinde düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle ve yüksek enerji absorbe etme kabiliyetine sahip olduğundan ponza takviyeli sintatik köpük metallerin kullanıldığı görülmüştür [6]. Bunun yanı sıra eklemeli imalat teknolojilerinin gelişmesi farklı tasarım güncellemelerine olanak sağlamıştır. Döküm ve talaşlı imalatta bulunan geometrik sınırların ötesinde üretimi mümkün kılan ve atık malzeme miktarını azaltan eklemeli imalat teknolojileri sayesinde, tasarlanan parçaların gerekli kısımlarında malzeme olmasını sağlayan, bal peteği şekline sahip boşluklu tasarımlar görülmüştür. Eklemeli imalat, bu gibi gözenekli tasarımların imal edilmesine olanak sağlarken aynı zamanda mekanik özellikler bakımından rekabetçi ürünlerin üretilmesini mümkün kılmaktadır [7-10]. Ancak bu yöntemler mevcut teknolojik durumda, yüksek üretim hacimlerinin görüldüğü otomotiv sektöründe zaman-maliyet açısından dezavantajlı kalmaktadır.

Bu bağlamda doğa bizlere, endüstrinin yeni parçaların üretiminde gözettiği hafiflik, sürdürülebilirlik isteklerini karşılayan hafif ama mukavim birçok malzeme seçeneği sunmaktadır. Bu seçenekler bitkilerden, hayvanlardan ya da doğal minerallerden elde edilen malzemeleri kapsamaktadır. Bu doğal kaynaklar polimer matrislerle karıştırılarak doğal elyaf takviyeli kompozitler üretilmektedir [11-18].

Bitki bazlı doğal elyaflara eğilecek olursak, geleneksel elyaflar bitkilerin yaprakları, tohumları, meyveleri, kabukları ve köklerinden elde edilebilmektedir. Bu elyafların temel yapıtaşları, selüloz, hemiselüloz ve lignin içermektedir. Lignin bitkide yerçekimi ve rüzgâr gibi dış kuvvetlere karşı mukavemet sağlarken hemiselüloz ise tüm elemanlar arasında uyum sağlayan bir ortam rolü oynamaktadır [19]. Bahsi geçen bu doğal elyafların doğada bol miktarda bulunması, biyo-çözünürlüğü, kenevir gibi bazı türlerinin yüksek mekanik özelliklere sahip olması şeklinde avantajları varken nem tutması ve tutuşmaya zafiyet gösterme gibi dezavantajları da mevcuttur [20-22]. Bu elyafların avantajları göz önünde bulundurulduğunda ve dezavantajlarına yönelik önlemler alındığında, bu malzemelerden üretilen yeni komponentlerin otomotiv sektöründe kullanılması şeklinde önemli bir trend gözlemlenmektedir. Özellikle, son yıllarda tarım alanında temel işlevlerini yerine getirdikten sonra geriye kalan atıklar polimer matrislerle karıştırılarak

birçok yeni kompozit malzeme elde edilmektedir. Bu yeni tarım bazlı kompozitlerin, araçların iç kısımda yer alan, paneller, konsollar, kapı ve koltuk tutacaklarında, aracın dışında ise ön ve arka tamponlarda ve ses yalıtımı için gerekli paneller gibi birçok yerde kullanıldığı görülmektedir. Tablo 1 farklı otomotiv firmalarının araçların çeşitli kısımlarında istifade ettiği doğal elyaf takviyeli kompozit bazlı komponentleri göstermektedir.

Tablo 1. Doğal elyaf takviyeli kompozitlerden üretilen otomobil komponentleri [5]

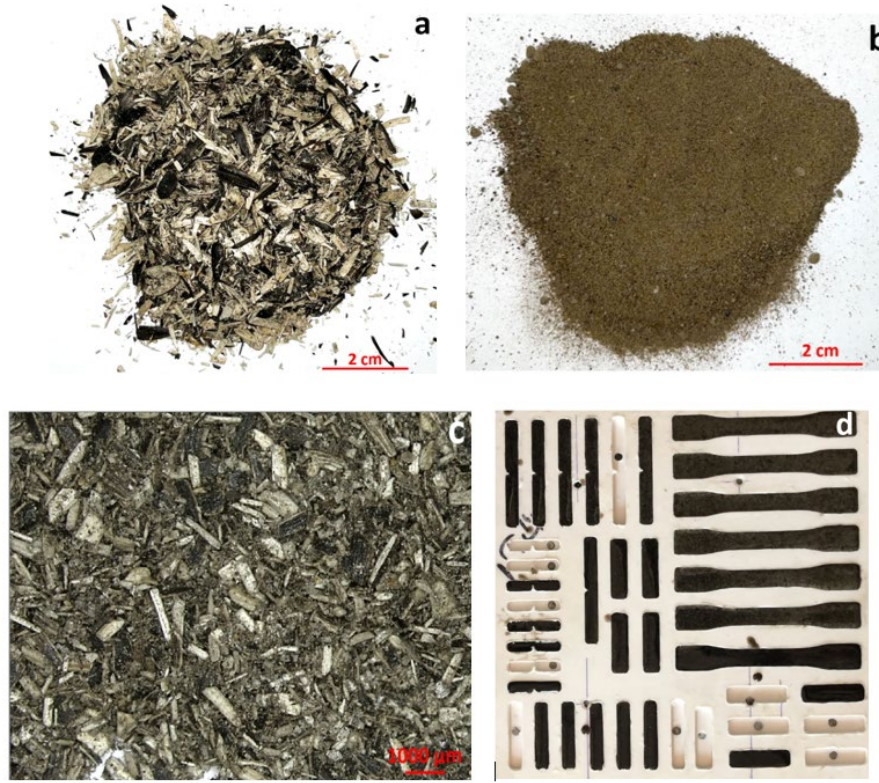
Otomobil Firması	Model/Komponent
AUDI	A3, A4, A4 Avant, A6, A8, Roadster, Coupe Koltuk arkalıkları, yan ve arka kapı panelleri, bagaj kaplaması, yedek lastik muhafazası
BMW	3, 5, 7 serileri kapı panelleri, tavan döşemesi paneli, bagaj kaplaması, koltuk arkalıkları
FORD	Mondeo CD 162, Focus kapı panelleri, Bpillar, bagaj kaplaması
CHRYSLER	Kapı paneli, ön cam gösterge paneli, yan sütun kapak paneli
OPEL	Astra, Vectra, Zafira Tavan döşemesi paneli, yan sütun kapağı paneli
ROVER	Rover 2000 ve diğerleri yalıtım, arka depolama rafı/paneli
SAAB	Kapı panelleri
SEAT	Kapı panelleri, koltuk arkalıkları
VOLKSWAGEN	Golf A4, Passat Variant, Bora Kapı paneli, koltuk arkalığı, bagaj kapağı paneli, bagaj astarı

Yukarıda da bahsedildiği üzere tarım atığı bazlı doğal elyaflardan pirinç çeltiği, buğday samanı, mısır koçanı kabuğu ve ayçiçeği çekirdeği kabuğu en sık olarak karşımıza çıkmaktadır [23]. Bunlar arasında ayçiçeği kabuğuna daha yakından bakarsak, ayçiçeği ağırlıklı olarak yağı için yetiştirilmekle birlikte biyodizel üretiminde de kullanılmaktadır [24-27]. Ayçiçeği, altı kıtada yetiştirilen ve toplam üretimi 54,42 milyon ton olan bir bitkidir. Türkiye'de 728 bin hektar alanda 2

milyon ton ayçiçeği tohumu üretilmektedir [28]. Ayçiçeği üretiminin %40-65'ini oluşturan ayçiçeği kabuğu, tarımsal bir yan üründür [29]. Ayçiçeği kabuğunun geri kazanımında başlıca yöntemler, yakıt amaçlı ayçiçeği kabuğundan pelet üretimi ve kıyılmış olarak samanın yerine hayvan yeminde kullanılması karşımıza çıkmaktadır [30, 31]. Bu yöntemlerin dışında katma değerli bir ürün üretme düşüncesiyle ayçiçeği kabuğundan yeşil kompozitlerin üretilmesi ilgi çekici bir konudur ve bu alanda çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalar arasından, Salasinska ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, ayçiçeği kabuğu (SH) takviyesi içeren polietilen bazlı kompozitler incelenmiştir [32]. Araştırmacılar, dolgu maddesinin şeklinin ve kimyasal bileşiminin üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini analiz etmeyi amaçlamıştır. Araştırmacılar, ayçiçeği kabuğu ilavesinin kompozitlerin sertliğini ve çekme mukavemetini artırdığını gözlemlemişlerdir. Buna karşılık, dolgu maddelerinin eklenmesinin gevrekliği artırdığı görülmüştür. Ayrıca, dolgu maddelerinin eklenmesi kompozit malzemenin porozitesi üzerinde de bir etki yaratarak mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir [33]. Barczewski ve arkadaşları, polipropilen bazlı ayçiçeği kabuğu (SH) takviyeli kompozitlerin mikroyapısı ve yüzey kalitesinin bir analizini yapmıştır [34]. Bulgular, SH partiküllerinin boyutu ile kompozitlerin sertliğinde gözlenen iyileşme arasında önemli bir korelasyon olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, takviye boyutu ve yüksek takviye konsantrasyonuna sahip kompozitlerde gözlemlenen çekme mukavemetindeki düşüş arasında bir ilişki keşfedilmiştir [34]. Yine Barczewski ve arkadaşlarının diğer bir çalışmasında düşük özkütleli polietilen ile SH %5-20 oranlarında karıştırılmış ve mekanik karakterizasyon sonrası SH takviyesinin kompozitlerde Young modülü ve çekme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir [35]. Kuram'ın yaptığı bir çalışmada ise, ABS terpolimer matrisine %5 ile %20 arasında değişen oranlarda SH takviyesi sonucunda üretilen kompozitlerde çekme ve eğilmedeki elastisite modülleri artış göstermiş, öte yandan SH'lerin iç yapıda gerilme konsantrasyon bölgeleri oluşturduğu gözlemlenmiştir [36]. Karpati ve arkadaşları ise kaba taneli (2,6 mm) SH tozunu polipropilen ve düşük/yüksek özkütleli polietilen matrislerine katarak kompozit üretmişlerdir. Tüm kompozit formülasyonlarında rijitliğin arttığını öte yandan uzama kapasitelerinin düştüğünü gözlemlemişlerdir [37]. Saba ve arkadaşlarının yapmış olduğu derleme çalışmasında da yukarıda belirtilen termoplastik matrislerin dışında polyester, vinilester ve epoksi gibi termoset reçinelerin de yukarıda bahsedilen tarımsal atıklarla karıştırılmasıyla elde edilen doğal elyaf takviyeli kompozitler incelenmiştir. Termoset reçinelerin temel avantajı olarak likit formda olmaları sayesinde doğal elyaflarla karıştırılmalarının daha pratik olduğu belirtilmiştir. Öte yandan, karışım sonrası iç yapıda hava boşluklarının olmaması için vakum altında kürlenme yapılması gerektiği belirtilmiştir [38].

Barczewski ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ayçiçeği kabuğu ile bisphenol A bazlı termoset reçineler karıştırılarak kompozitler üretilmiş ve SH takviyesi ile rijitlikte %20 ve sertlikte ise %8'lik bir artış gözlemlenmiştir [32]. Doğal elyaf takviyeli kompozitlere yönelik incelenen bir başka metot ise, takviye elemanlarının yüzey iyileştirmeye yönelik NaOH ile işleme tabi tutulmasıdır. Doğal elyaf olan SH'ler, glikoz birimlerinden oluşan bir polisakkarit olan selülozdan oluşmaktadır. Selülozun moleküler düzeninde hidroksil (OH) gruplarının varlığı, SH'lere hidrofilik bir özellik kazandırır, bu da onların neme karşı bir eğilimi olduğunu gösterir. Hidroksil gruplarının varlığı, selüloz lifleri arasında hidrojen bağının oluşmasından da sorumludur, bu da liflerin polimer matrisler içinde dağılmasında zorluklara ve sentetik kompozit matrisleriyle yetersiz uyumluluğa neden olur. Bu uyumsuzluğun giderilmesi için SH'lere alkali yüzey kimyasal işlemi yapılmaktadır. Alkali işlemi, farklı elyaf türleri için geniş bir kimyasal uygulama yelpazesinde etkili ve yaygın bir yöntemdir. Fibrilasyonun bir sonucu olarak, alkali işlemi kompozit elyaf demetinin daha ince elyaflara ayrılmasına izin verir. Dolayısıyla, elyaf çapını azalması, elyafın en-boy oranını artırır, bu da elyaf-matris ara yüzey kalitesini iyileştirerek mekanik özellikleri iyileştirmektedir. Ayrıca alkali işlemi, potansiyel reaktif bölgelerin sayısını ve elyaf hidrasyonunu arttırmaktadır [39]. Takviye elemanının değişken reçetelerde NaOH aracılığıyla alkali işleme tabi tutulmasının ardından, takviye edildiği kompozite yönelik mekanik özelliklerde iyileşme gözlenmiştir. Bu durum, takviye elemanının matris malzemesine temas ettiği yüzeyinin pürüzlülüğünün artması ve temas yüzeyinin üzerindeki parçacık ve kalıntıların büyük ölçüde ortadan kaldırılması gibi sebeplerle gerçekleşmektedir. Thamae ve arkadaşları, Agave Americana elyaflarına NaOH ile alkali işlem uygulamış ve bu işlemin kompozitin karakteristik dayanımını %30 oranında artırdığını gözlemlemiştir [40]. Goud ve arkadaşları, Roystonea regia elyafına 2 saat süre ile kütlece %5 alkali işlem uygulamış ve bu işlemin kütlece %20 elyaf içeren kompozitin çekme dayanımını %8 ve Young Modülünü %2,6 artırdığını gözlemlemiştir [41]. L. Yan, keten liflerine kütlece %5 alkali işlem uygulamış ve bu işlemin basma dayanımını %3 oranında artırdığını gözlemlerken, bu iyileştirmenin yalnızca uygulanan alkali işlem kaynaklı olduğunu, matris ve fiber arasındaki bağ kuvvetinin artması ve bağlanma ara yüzeyindeki parçacıkların temizlenmesi ile gerçekleştiğini vurgulamıştır [42].

Alandaki literatürün kapsamlı bir incelemesinden sonra, bu çalışmalarda ortak nokta çeşitli tarımsal atıkların ve oranlarının çekme mukavemeti, kopma uzaması ve elastik modül dahil olmak üzere temel mekanik özellikler üzerindeki etkisinin çeşitli araştırmacılar tarafından incelendiği görülmektedir.



Şekil 1. a) SH'lerin öğütülme öncesi hali b) SH'lerin öğütüldükten sonraki hali c) Öğütülme sonrası SH'lerin optik mikroskopla incelenmesi d) Karıştırma sonrası kalıba dökülen kurlenme öncesi durum

Ancak, yazarların incelemelerine göre, biyo-epoksi bazlı SH takviyeli tamamen biyo-bozunabilir kompozitlerin geliştirilmesine yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanmadığı gibi, sodyum hidroksit (NaOH) ile yüzey iyileştirmesinin SH takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisine ilişkin bir araştırmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle, bu çalışma, likit biyo-epoksi reçine ile SH'lerin karıştırılıp vakum altında kalıplama yoluyla doğal elyaf takviyeli kompozitlerin imal edilmesi ve sonrasında Shore D sertlik ve çekme testleri ile karakterize edilmesini konu almıştır. Ayrıca, mekanik karakterizasyon tamamlandıktan sonra, hasar ve toklaştırma mekanizmalarını ortaya çıkarmak için kırılan numunelerin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

II. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada kullanılan ayçiçeği kabukları Sterco® Agriculture'dan temin edilmiş (Şekil 1a) ve kullanılmadan önce 24 saat süreyle 60°C sıcaklıktaki bir şartlandırma fırınında kapsamlı bir kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra, kurutulmuş kabuklar 3 dakika süreyle dakikada 24.000 devir hızında çalışan Lavion® marka bir öğütücü kullanılarak ince bir toz haline getirilmiştir (Şekil 1b).

Parçacık boyutu, öğütme işleminin ardından bir optik mikroskop kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 1c).

Öğütülmüş olan SH'ler, Giriş bölümünde belirtildiği üzere NaOH içeren alkali çözeltiler ile yüzey işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu işlem kimyasal olarak "Elyaf-OH + NaOH → Fiber-O⁻Na⁺ + H₂O" olarak gösterilir ve bu çalışmada SH'ler çözelti/elyaf oranı 20 olan, %15'lik bir NaOH çözeltisinde bir mikser ile 500 dev/dak olacak şekilde 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Sonrasında filtreleme ve saf su ile yıkama işlemi yapıldıktan sonra aktive edilmiş bu elyaflar 50 °C'de bir hafta boyunca kurutulmuştur. Bu işlem sonrasında kompozit imalat aşamasına geçilmiştir. Kompozit imalatında kullanılan biyo-epoksi reçine olarak Entropy Resins® Super SAP ER-ONE-3 isimli reçinesi ve Super SAP ONF isimli sertleştiricisi kullanılmıştır.

Reçine-sertleştirici oranı olarak ürün katalogunda yer alan 2:1 oranı kullanılmıştır. Tablo 2'de bu çalışma kapsamında imal edilen kompozitlere ait kompozisyonları göstermektedir.

Tablo 2. Biyo-epoksi matrisli SH takviyeli kompozitlere ait kompozisyonlar

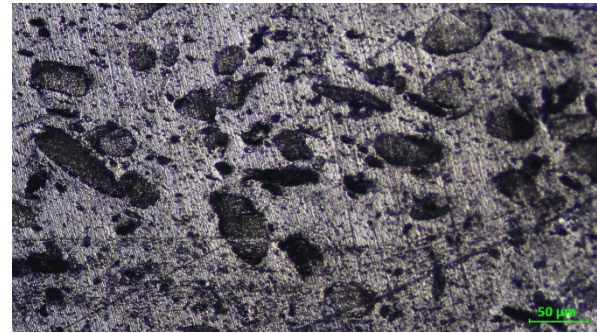
Kompozisyon Adı	Biyo-epoksi matris (kütle %)	Ayçiçeği kabuğu (kütlece %)	NaOH yüzey işlemi
Epoksi (yalın)	100	-	Yok
ESH5	Denge	5	Yok
ESH10		10	
ESH20		20	
ESH5N		5	Var
ESH10N		10	
ESH20N		20	

Kompozit bileşimleri belirlendikten sonra, Tablo 2'deki SH/reçine oranları gözetilerek karışımlar hazırlanmıştır. Epoksiye SH katılmasıyla beraber, karışımın viskozitesi yükseldiği için homojen bir karışım sağlanabilmesi için karışım 50 °C'ye ısıtılmıştır. Isıtılan bu karışım IKA® Eurostar 20 markalı yüksek hızlı karıştırıcı ile 2 saat boyunca 700 dev/dak hızında karıştırıldıktan sonra bu karışım Şekil 1d'de verilen PTFE (Teflon) kalıba dökülmüştür. Sonrasında bu kalıp sıcaklık kontrollü bir vakum fırınına alınarak burada 60 °C'de 24 saat süreyle kürlenmeye bırakılmıştır. Kürlenme sonrası numuneler, ortamdaki nem kapmaması için bir desikatörde tutulmuştur. Bu çalışmada üretilen doğal elyaf takviyeli kompozitler, Shore D sertlik ve çekme testleri ile deneysel olarak karakterize edilmiştir. Çekme testleri, Shimadzu AG-x 50 kN üniversal test cihazı kullanılarak ASTM D-638'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir ve her kompozisyon grubu için 5 numune kullanılmıştır [43]. Shore D sertlik ölçüm aparatı ile ASTM D2240 standardına uygun olarak ölçümler yapılmıştır ve numune üzerinde 5 farklı noktadan ölçüm alınmıştır [44]. Testler yapıldıktan sonra, kırılan numunelerin kırık yüzeyleri Tescan Vega 3 taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir.

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmaların ilk adımı olarak imal edilen kompozitler Shore D sertlik testine tabi tutulmuştur ve sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'ün değerlendirmesinden önce, ayçiçeği kabuğunun kendi sertliği hakkında yorum yapmak gereklidir. Doğal elyafların düzenli olmayan yapılarından ve kalınlıklarından dolayı, Shore D skalasında sertliklerini ölçmek deneysel açıdan hatalı sonuçlar verebilmektedir [45]. Çünkü, Shore D yönteminde olduğu gibi makro ölçekteki bir batırıcı uç yardımıyla yapılan ölçümler kabuk üzerinde birçok nokta üzerinde alınıp ortalaması alınsa dahi tam doğru sonucu verememektedir. Bu nedenle literatürde yer alan benzer çalışmalarda kuru haldeki doğal elyafların, epoksi matristen daha sert bir yapıya sahip olduğu bilgisi verilmiştir [33,46,47].

Bununla paralelinde Tablo 3'ten elde edilen ilk izlenim, SH'lerin kompozitlerin sertliğini arttırdığıdır. SH'ler lifli yapılarından dolayı epoksi kompozitin yüzeyinin plastik deformasyonunu zorlaştırmakta ve bu şekilde sertlik artmaktadır. Tablo 3'ten gözlemlenen ikinci husus ise, NaOH ile alkali yüzey işlemi yapılan kompozisyonlar yapılmayanlara göre hem daha yüksek sertliğe sahiptir hem de sonuçlardan elde edilen sapmalar daha düşüktür. Bunun temel nedeni, yüzey işlemi öncesinde SH'lerin üzerinde yağ ve türevi kalıntıların varlığıyla birlikte epoksi/SH ara yüzeyinde görülebilecek süreksizlikler ve lokal iç kusurlar olabilir. Ayrıca sonuçlardaki standart sapmanın düşmesinin temel nedeni olarak, yüzey işlemiyle birlikte SH'lerin iç yapıda daha homojen bir şekilde yayılmasıyla, ölçümün alındığı noktalarda benzer SH dağılımı elde edildiği kanısına varılmıştır. Bu düşüncüyü desteklemek için ESH20N kompozisyonuna ait çekme numunelerinden bir tanesinden bir kesit alınmış ve soğuk bakalitleme ve parlatma sonrasında optik mikroskopla takviyelerin iç yapıdaki dağılımı incelenmiştir ve Şekil 2'de verilmiştir.

**Şekil 2.** SH takviyeli kompozitlerin optik mikroskop ile iç yapısının incelenmesi (ESH20N)

Şekil 2'de koyu renkli düzensiz şekle sahip elemanlar SH'ler olarak tanımlanmıştır. Açık renkli kısım ise epoksi reçinedir. Bu şekil, takviye elemanlarının iç yapıda homojen olarak dağıldığını destekleyici niteliktedir.

Tablo 3. SH takviyeli biyo-epoksi bazlı kompozitlerin Shore D sertlik ölçümleri

Kompozisyon Adı	Sertlik (Shore D)
Epoksi (yalın)	70 ± 0.1
ESH5	71 ± 0.8
ESH10	71.5 ± 0.6
ESH20	72.5 ± 1.2
ESH5N	71.5 ± 0.2
ESH10N	73 ± 0.4
ESH20N	75.4 ± 0.4

Elde edilen sertlik değerleri literatürde yer alan benzer çalışmalar ile de karşılaştırılmıştır. Ayçiçeği

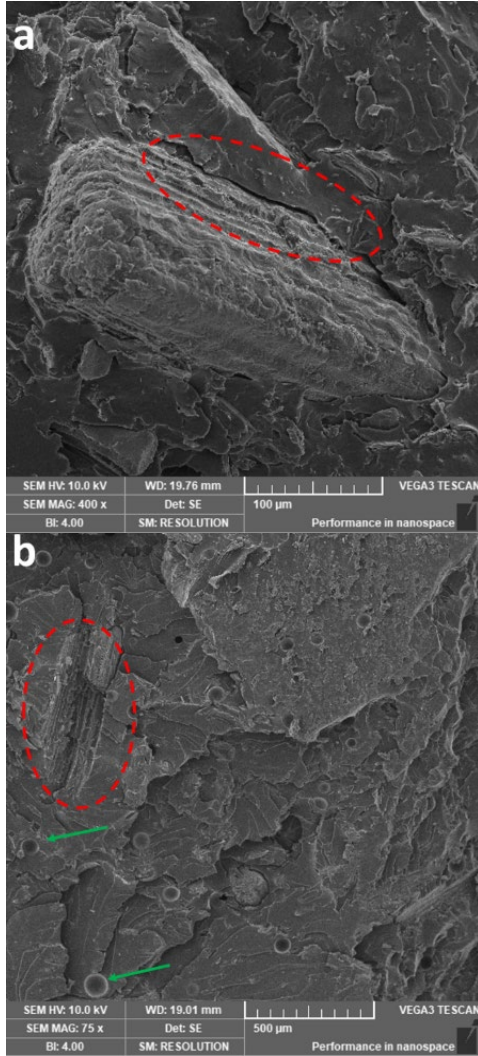
kabuğunun termoplastik matrislerde takviye elemanı olarak kullanıldığı kompozitlerde de sertlik %30 elyaf oranına kadar artış göstermiş, daha yüksek takviye oranlarında (örn: kütlece %55) ise sertliğin düştüğü görülmüştür. Bunun temel nedeni olarak da elyaf matris ara yüzeyindeki ayrışmaların ve elyaf kümelenmelerinin olduğu belirtilmiştir [48]. Sertlik ölçümlerinden sonra, çekme testleri gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'te gösterilen verilere dayanarak, SH'nin epoksi matrisine katılmasının kompozitlerin çekme mukavemetinde küçük bir azalmaya yol açtığı gözlemlenebilir. Buna karşılık, üretilen kompozitlerin kopma uzamasında önemli bir düşüş görülmüştür. Bu durum, üretim süreci sırasında malzemede oluşan süreksizliklere bağlanabilir. Özellikle kimyasal yüzey işlemine tabi tutulmayan kompozisyonlarda, SH'lerin yüzeyinde kalabilen yağ, vb. kalıntılar matris ve kabuklar arasındaki ara yüzey mukavemetini azaltma potansiyeline sahiptir [33]. Ayrıca, organik elyafların üretim sürecinde aglomerasyonların kolayca oluşabildiğini ve sonuçta ortaya çıkan malzemeye heterojenlik getirdiğini belirtmek gerekir [49]. Malzemeye yük uygulanması sonrasında bu heterojenliklerin varlığı iç yapıdaki gerilme çizgilerinin akıcılığını ve tutarlılığını bozarak malzemenin yük taşıma kapasitesinde düşüşe neden olur. Alkali yüzey işlemi uygulanan kompozisyonlarda daha yüksek çekme gerilmelerinin ve kopma uzamalarının gözlemlenmesi bu tezleri destekler niteliktedir. Testlerden elde edilen diğer önemli bir sonuç da SH'nin epoksi reçineye dahil edilmesiyle, kompozitlerin elastisite modülünde önemli bir artış görülmüştür. Gözlenen bu olgu, SH'nin epoksi reçineye göre daha sert bir yapıda olmasına bağlanabilmektedir [46, 47]. Kompozit malzemelerin artan rijitliği, uygulama alanlarını genişletme potansiyeline sahiptir. NaOH ile yüzey işleminin çekme deneyi sonuçlarındaki etkilerinden bahsedecek olursak, alkali yüzey işlemi sonucu SH'lerin yüzeyinden elimine edilen kalıntıların yoksunluğuyla birlikte epoksi matrisi ve SH arasında ek Van der Waals bağları kurulabilmekte ve bu bağlar sayesinde matris-fiber ara yüzey dayanımı artarak kompozitler daha yüksek çekme dayanımlarına sahip olabilmektedir. Elde edilen SH takviyeli kompozit numunelerinin mekanik özelliklerindeki değişimlerin temel sebeplerine yönelik yorum yapabilmek adına, mekanik özellik tayini için yapılan testler sırasında oluşan kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında, elyaf formundaki SH ile matris ara yüzey kalitesinin mekanik test sonuçlarına etkisini göstermek için, bir grup kompozisyonda SH toz haline getirme sonrasında direkt olarak kullanılırken, diğer grup numunelerde ise SH'ler NaOH ile yüzey işlemine tabi tutulmuştur. Bilindiği üzere NaOH işlemine tabi tutulmayan SH'ler üzerindeki hali hazırda bulunan hidroksil gruplarının varlığı, matris ile elyaf arasındaki bağlanma eğilimini düşürmektedir.

Tablo 4. SH takviyeli biyo-epoksi bazlı kompozitlere ait çekme testi sonuçları

Kompozisyon Adı	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Elastisite Modülü (GPa)
Epoksi (yalın)	48.42 ± 0.18	5.6 ± 0.3	2.61 ± 0.5
ESH5	38.24 ± 2.14	2.1 ± 0.8	2.83 ± 0.2
ESH10	40.42 ± 1.86	2.3 ± 0.9	2.88 ± 0.2
ESH20	41.88 ± 1.42	2.7 ± 0.3	2.92 ± 0.3
ESH5N	39.33 ± 1.16	2.8 ± 0.8	2.85 ± 0.1
ESH10N	41.12 ± 0.84	2.9 ± 0.9	2.91 ± 0.2
ESH20N	43.23 ± 1.42	3.2 ± 0.3	3.03 ± 0.2

Şekil 3a ve b yüzey işlemine tabi tutulmayan numunelerin kırılma sonrası yapılan SEM görüntülerini vermektedir. Şekil 3a'da kırmızı kesikli çizgiyle verilen bölgede, matris ile SH'ye ait lif demeti arasında bir boşluk görülmektedir. Bu boşluk, matris-takviye elemanı bağlanmasının yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği üzere, elyaf takviyeli kompozitlerde gerilme transferi kayma gerilmeleri ile aktarılmaktadır ve Cox modeli bu durumun mekanizmasını açıklamaktadır [50]. Lif demeti ile matris arasındaki boşluk, gerilme transferi için gerekli kritik lif uzunluğunun sağlanmasını engellemektedir. Dolayısıyla, bu süreksizlik nedeniyle matris üzerinden, yük taşıma kapasitesi olan elyaf demetine etkin bir gerilme aktarılamamaktadır. Bu da çekme gerilmelerindeki düşüşün nedenlerinden biridir. Ayrıca, Şekil 3b'de yeşil oklarla gösterildiği üzere, imalat vakum altında yapılsa dahi birtakım hava boşlukları iç yapıda gözlemlenmiştir. Bu boşluklar iç yapı kusurları şeklinde davranır ve bir yük altında gerilme konsantrasyonu oluşturarak malzemenin tahmin edildiğinden daha erken kırılmasına neden olmaktadır. Gerilme konsantrasyonu, gerilme şiddet faktörü (KI) ile nicelik olarak ifade edilebilmektedir. Yük altında iç kusurlar için kritik hal hesabı yapılırken; $KI = \sigma\sqrt{(\pi.a)} > KIc$ durumu söz konusu ise kırılma gözlenir. Burada a iç kusur boyu, σ uygulanan gerilme, KIc ise mod I için malzemenin kırılma tokluğunu vermektedir. Buradan hareketle iç yapıdaki kusurlar ne kadar büyük ve yoğun olursa malzemenin erken kırılma ihtimali artacaktır. Bahsedilen bu hasar mekanizmalarına ek olarak, Şekil 3b'de kırmızı kesikli çizgi ile gösterilen kavisli bir boşluğun varlığı, elyaf dekohezyonunun meydana geldiğini gösterir. Elyafın bulunduğu yerden fırlaması olarak ifade edilen dekohezyon, malzemenin yük taşıma kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır.

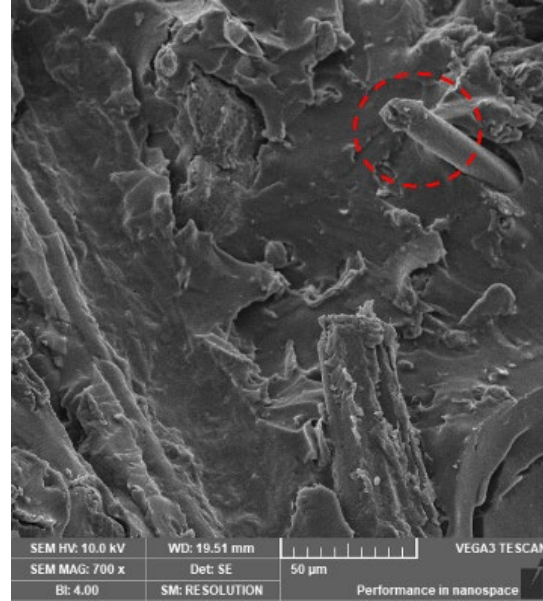


Şekil 3. SH takviyeli kompozitlerin kırılma yüzeyleri
a) ara yüzey boşluğu b) dekohezyon

Son olarak da Şekil 4'te kırmızı kesikli çizgi ile verilen kırılma yüzeyine dik olarak gözlemlenen lif, iç yapıdaki toklaştırma mekanizmalarından birisi olan yerinden sökülme (pull-out) etkisini göstermektedir. Bu sökülme esnasında elyaf demeti, yüzey kuvvetleri ile yer değiştirir ve bunun gerçekleşmesi için bir miktar enerji harcanması gereklidir. Harcanan bu enerji test esnasındaki şekil değiştirme enerjisinden karşılanır ve çatlağın ilerlemesi için gerekli enerjinin bir miktarı tüketilerek kırılma geciktirilir. Bu mekanizma genellikle köprüleme mekanizması ile birlikte görülür. Köprüleme etkisi kapsamında, çatlak ilerlemeye devam ederken çatlak bölgesinde bulunan lifler, çatlakın iki yanını adhezyon kuvveti nispetinde bir arada tutar [51], [52]. Bu şekilde çatlakın açılması geciktirilmiş olur. Bu etki liflerin malzemedeki oranı yükseldikçe artış gösterebilmektedir ve bu durum Tablo 4'te verilen sonuçlarla paralellik arz etmektedir.

Burada incelenen, hasar ve toklaştırma mekanizmaları ve iç kusurların hepsinin birlikte çekme testi sonuçlarına etki etmektedir. Yukarıda bahsedilen mekanizmalar dahilinde çatlak ilerlemesi geciktirilmiş olsa dahi, iç yapı kusurlarının, heterojenitenin ve

süreksizliklerin yoğunluğunun yüksek olduğu durumlarda gerilme konsantrasyonu etkisi daha dominant bir karakter gösterir ve imal edilen malzemelerde erken kırılmalar gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4. SH takviyeli biyo-epoksi matrisli kompozitlerde gözlemlenen çatlak köprüleme mekanizması

IV. SONUÇ

İmalat sektörü, iklim krizi, azalan kaynaklar ve artan hammadde maliyetleri nedeniyle yeni sürdürülebilir, uygun maliyetli ve hafif malzemelerin geliştirilmesine yönelmiştir. Günümüzde, doğal elyaf takviyeli kompozitler, çelik gibi geleneksel malzemelerin yerine uygulanabilir alternatifler oluşturmaktadır. Tarım atığı olarak karışımıza çıkan doğal elyaflar arasında ayçiçeği kabuğu, rahat erişilebilir olması ve avantajlı malzeme özellikleri nedeniyle önemli bir potansiyel içermektedir. Bu çalışma kapsamında, biyo-epoksi matrisi ile ayçiçeği kabukları toz haline getirildikten sonra karıştırılarak kompozitler imal edilmiş ve sonrasında çekme deneyleri ve sertlik ölçümleriyle birlikte deneysel olarak karakterize edilmişlerdir. Ayrıca, bu kompozitler geliştirilirken, ayçiçeği kabuklarının NaOH ile yüzey işlemine tabi tutulmasının mekanik performansa etkisi de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, SH takviyesi kompozitlerin çekme dayanımını ve kopma uzamasını düşürürken, elastisite modülünü arttırmıştır. NaOH işlemi de mekanik sonuçlarda bir artışı beraberinde getirmiştir. Mekanik özelliklerin tespitine yönelik çekme deneyinden sonra hasarlı numunelerin kırılma yüzeyleri SEM ile incelenmiş ve yüzey işlemine tabi tutulmayan numunelerde ara yüzey problemleri gözlemlenmiştir. Ayrıca elyaf sökülmesi (pull-out) ve çatlak köprüleme mekanizmaları da bu tip doğal elyaf takviyeli kompozitlerde bir toklaştırma mekanizması olarak karışımıza çıkmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma neticesinde elde edilen kompozitler, literatürdeki benzer çalışmalarla

karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, geliştirilen kompozitlerin en büyük avantajları biyo-bozunabilirliği, düşük maliyeti ve sürdürülebilir nitelikleridir. Öte yandan termoset reçinelerin imalat prosesi, termoplastiklere oranla otomatize edilmesi açısından daha zordur. Tüm bu avantajlar ve dezavantajlar birlikte değerlendirildiğinde bu projede geliştirilen bu kompozitler otomotiv sektöründe stepne yuvaları, koltuk arkalıkları, bagaj zeminleri, kapılardaki akustik paneller ve hava yastığı muhafazaları dahil olmak üzere birçok bileşende hafifletme uygulamaları için önemli potansiyel taşımaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar biyo-epoksi malzeme desteği açısından Etap Marin'den Sema Çarkçı'ya teşekkür etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] General Assembly of UN. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/89/PDF/N1529189.pdf?OpenElement>
- [2] [Kuram, E. (2021b). Advances in development of green composites based on natural fibers: a review. *Emergent Materials*, 5. <https://doi.org/10.1007/s42247-021-00279-2>
- [3] Zweben, C. (2005). Composite Materials. *Mechanical Engineers' Handbook*, 380–417. <https://doi.org/10.1002/0471777447.ch10>
- [4] Cheah, L. W. (2010). Cars on a Diet: The Material and Energy Impacts of Passenger Vehicle Weight Reduction in the U.S. Doktora Tezi, Massachusetts Institute Of Technology, Amerika Birleşik Devletleri s. 31-34.
- [5] Ravishankar, B., Nayak, S. K., & Kader, M. A. (2019). Hybrid composites for automotive applications – A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38(18), 835–845. <https://doi.org/10.1177/0731684419849708>
- [6] Bolat, Ç., Ergene, B., Karakılınç, U., & Gökşenli, A. (2021). Investigating on the machinability assessment of precision machining pumice reinforced AA7075 syntactic foam. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 236(5), 2380–2394. <https://doi.org/10.1177/09544062211027613>
- [7] Ergene, B., Şekeroğlu, İ., Bolat, Ç., & Yalçın, B. (2021). An experimental investigation on mechanical performances of 3D printed lightweight ABS pipes with different cellular wall thickness. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 15(2), 8169–8177. <https://doi.org/10.15282/jmes.15.2.2021.16.0641>
- [8] Rosen, D. W. (2007). Computer-Aided Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures. *Computer-Aided Design and Applications*, 4(5), 585–594. <https://doi.org/10.1080/16864360.2007.10738493>
- [9] Ergene, B., & Yalçın, B., (2022). Eriyik yığma modelleme (EYM) ile üretilen çeşitli hücresel yapıların mekanik performanslarının incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(1), 201–218. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.945650>
- [10] Ergene, B. (2021). Farklı bağıl yoğunluklardaki Inconel 718 ve Ti6Al4V biyomedikal parçaların seçici lazer ergitme (SLE) metoduyla üretiminin simülasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(1), 469–484. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.934143>
- [11] Fragassa, C., Santulli, C., Pavlović, A., & Šljivić, M. (2015). Improving performance and applicability of green composite materials by hybridization. *Contemporary Materials*, 6(1). <https://doi.org/10.7251/comen1501035f>
- [12] Appadurai, M., Fantin Irudaya Raj, E., & LurthuPushparaj, T. (2022). Sisal fiber-reinforced polymer composite-based small horizontal axis wind turbine suited for urban applications—a numerical study. *Emergent Materials*. <https://doi.org/10.1007/s42247-022-00375-x>
- [13] [Mayilswamy, N., & Kandasubramanian, B. (2022). Green composites prepared from soy protein, polylactic acid (PLA), starch, cellulose, chitin: a review. *Emergent Materials*. <https://doi.org/10.1007/s42247-022-00354-2>
- [14] Vijayan, R., & Krishnamoorthy, A. (2019). Review On Natural Fiber Reinforced Composites, *Materials Today: Proceedings*, 16(2), 897-906, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.175>.
- [15] Bledzki, A.K., & Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres, *Progress in Polymer Science*, 24(2), 221-274, [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5).
- [16] Açıkbaş, G. (2018). Interfacial and physico-mechanical properties of walnut shell fiber reinforced polyester matrix composites. *Materials Testing*, 60(5), 510-518. <https://doi.org/10.3139/120.111176>
- [17] Gürü, M., Atar, M., & Yıldırım, R. (2008). Production of polymer matrix composite particleboard from walnut shell and improvement of its requirements. *Materials & Design*. 29. 284-287. [10.1016/j.matdes.2006.10.023](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.10.023).
- [18] Gokdai, D., Borazan, A.A. & Acikbas, G. (2017). Effect of Marble: Pine Cone Waste Ratios on Mechanical Properties of Polyester Matrix Composites. *Waste Biomass Valor*, 8, 1855–1862. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9856-6>
- [19] Kalia, S., Kaith, B. S., & Kaur, I. (2009). Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites-A review. *Polymer Engineering & Science*, 49(7), 1253–1272. <https://doi.org/10.1002/pen.21328>

- [20] Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2019). A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications. *Journal of Materials Science*, 55(3), 829–892. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y>
- [21] Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H.-P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- [22] Brebu, M. (2020). Environmental Degradation of Plastic Composites with Natural Fillers—A Review. *Polymers*, 12(1), 166. <https://doi.org/10.3390/polym12010166>
- [23] Elmali, M., & Demir, I. (2020). Organik atıkların yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. 8. 1303-1311. 10.21923/jesd.781554.
- [24] Ersus, S., Yağın Melikoğlu, A., & Cesur, S. (2019). Tarımsal Atıklardan Selüloz Nanokristallerinin Eldesi, Karakteristik Özellikleri ve Uygulama Alanları. *Akademik Gıda*. 17. 140-148. 10.24323/akademik-gida.544980.
- [25] Kapluhan, E. (2014). Enerji coğrafyası açısından bir inceleme: biyokütle enerjisinin dünyadaki ve Türkiye'deki kullanım durumu. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 0 (30), 0-. DOI: 10.14781/mcd.98631
- [26] Uzun, B. B., Kılıç, M., & Pütün, A. E. (2007). Ayçiçeği yağından transesterifikasyon yöntemiyle biyodizel üretimi, *1.Ulusal Yağlı Tohumlu Bitkiler ve Biyodizel Sempozyumu*, p. 3
- [27] Kılıç, F. (2007)., Gıda ve yakıt amaçlı kanola ve aspir üretim potansiyeli ve bazı yağlı tohumlu bitkilerin yakıtla ilişkili önemli özellikleri, *1.Ulusal Yağlı Tohumlu Bitkiler ve Biyodizel Sempozyumu*, p. 51
- [28] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü Müdürlüğü. Tarım Ürünleri Piyasaları. <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/tepge/Menu/27/Tarim-Urunleri-Piyasaları>
- [29] Perea-Moreno, M.-A., Manzano-Agugliaro, F., & Perea-Moreno, A.-J. (2018). Sustainable Energy Based on Sunflower Seed Husk Boiler for Residential Buildings. *Sustainability*, 10(10), 3407. <https://doi.org/10.3390/su10103407>
- [30] Binboğa, M. Ü. (2019). An Overview of Importance and Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Production. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*, 2(2), 58–71. <https://doi.org/10.38001/ijlsb.535889>
- [31] Bala-Litwiniak, A., & Zajemska, M. (2020). Computational and experimental study of pine and sunflower husk pellet combustion and co-combustion with oats in domestic boiler. *Renewable Energy*, 162, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.139>
- [32] Barczewski, M., Sałasińska, K., & Szulc, J. (2019). Application of sunflower husk, hazelnut shell and walnut shell as waste agricultural fillers for epoxy-based composites: A study into mechanical behavior related to structural and rheological properties. *Polymer Testing*, 75, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.017>
- [33] Salasinska, K., & Ryszkowska, J. (2014). The effect of filler chemical constitution and morphological properties on the mechanical properties of natural fiber composites. *Composite Interfaces*, 22(1), 39–50. <https://doi.org/10.1080/15685543.2015.984521>
- [34] Barczewski, M., Andrzejewski, J., Majchrowski, R., Dobrzycki, K., & Formela, K. (2021). Mechanical Properties, Microstructure and Surface Quality of Polypropylene Green Composites as a Function of Sunflower Husk Waste Filler Particle Size and Content. *Journal of Renewable Materials*, 9(5), 841–853. <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.014490>
- [35] Barczewski, M., Matykiewicz, D., Piasecki, A., & Szostak, M. (2017). Polyethylene green composites modified with post agricultural waste filler: thermo-mechanical and damping properties. *Composite Interfaces*, 25(4), 287–299. <https://doi.org/10.1080/09276440.2018.1399713>
- [36] Kuram, E. (2020). Rheological, mechanical and morphological properties of acrylonitrile butadiene styrene composite filled with sunflower seed (*Helianthus annuus* L.) husk flour. *Journal of Polymer Research*, 27(8). <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02211-4>
- [37] Kárpáti, Z., Kun, D., Fekete, E., & Móczó, J. (2021). Structural biomaterials engineered from lignocellulosic agricultural waste. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(26), 50617. <https://doi.org/10.1002/app.50617>
- [38] Saba, N., Jawaid, M., Alothman, O. Y., Paridah, M., & Hassan, A. (2015). Recent advances in epoxy resin, natural fiber-reinforced epoxy composites and their applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(6), 447–470. <https://doi.org/10.1177/0731684415618459>
- [39] Kalia, S., Kaith, B. S., & Kaur, I. (2009). Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites-A review. *Polymer Engineering & Science*, 49(7), 1253–1272. <https://doi.org/10.1002/pen.21328>
- [40] Thamae, T., & Baillie, C. (2007). Influence of fibre extraction method, alkali and silane treatment on the interface of Agave americana waste HDPE composites as possible roof ceilings in Lesotho. *Compos. Interfaces*, 14, 821–836.
- [41] Goud, G., & Rao, R.N. (2011). Effect of fibre content and alkali treatment on mechanical properties of Roystonea regia-reinforced epoxy

- partially biodegradable composites. *Bull. Mater. Sci.*, 34, 1575–1581.
- [42] Yan, L. (2012). Effect of alkali treatment on vibration characteristics and mechanical properties of natural fabric reinforced composites. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 31, 887–896.
- [43] **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics** <https://www.astm.org/d0638-10.html>
- [44] American Society for Testing and Materials. (1972). *Glossary of terms relating to rubber and rubber technology*. ASTM.
- [45] Sheppard, S. E., & Schmitt, J. J. (1932). Measurement of surface hardness of cellulose derivatives. *Industrial & Engineering Chemistry*, 4(3), 302–304. <https://doi.org/10.1021/ac50079a027>
- [46] Sain, M., Park, S. H., Suhara, F., & Law, S. (2004). Flame retardant and mechanical properties of natural fibre-PP composites containing magnesium hydroxide. *Polymer Degradation and Stability*, 83(2), 363–367. [https://doi.org/10.1016/s0141-3910\(03\)00280-5](https://doi.org/10.1016/s0141-3910(03)00280-5)
- [47] Chen, X., Yu, J., Guo, S., Lu, S., Luo, Z., & He, M. (2009). Surface modification of magnesium hydroxide and its application in flame retardant polypropylene composites. *Journal of Materials Science*, 44(5), 1324–1332. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3273-6>
- [48] Cisneros-López, E. O., González-López, M. E., Pérez-Fonseca, A. A., González-Núñez, R., Rodrigue, D., & Robledo-Ortiz, J. R. (2016). Effect of fiber content and surface treatment on the mechanical properties of natural fiber composites produced by rotomolding. *Composite Interfaces*, 24(1), 35–53. <https://doi.org/10.1080/09276440.2016.1184556>
- [49] Irez, A. B. & Kaya, R. (2022). Geri Dönüştürülmüş PP Bazlı Nano Grafen Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin Mikromekanik Yöntemler ile Belirlenmesi . *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences* , 34 (4) , 569-579 .
- [50] Cox, H. L. (1952). The elasticity and strength of paper and other fibrous materials. *British Journal of Applied Physics*, 3(3), 72–79. <https://doi.org/10.1088/0508-3443/3/3/302>
- [51] Wells, J.-P. R., & Peter. (1985). Debonding and pull-out processes in fibrous composites. *Journal of Materials Science*, 20(4), 1275–1284. <https://doi.org/10.1007/bf01026323>
- [52] Irez, A. B. & Yirik, S. (2023). Development of Cost-Effective Sustainable Hybrid Composites Based on Recycled PP and Chopped Carbon Fibers. *Proceedings of the 8th International Conference on Mechanical, Automotive and Materials Engineering*, 145–155. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3672-4_12

Taşıt Sürücülerinin Tüm Vücut Titreşim Maruziyetlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi

Evaluation of Whole Body Vibration Exposures for Vehicle Drivers in terms of Occupational Health and Safety

Akif YAVUZ¹ 

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34437, Türkiye*

Öz

Şoförlük, birçok sektörde kilit rol oynayan önemli bir meslektir. Taşımacılık, lojistik, kamu hizmetleri, kurye dağıtım hizmetleri ve turizm gibi pek çok sektörde taşıt sürücüleri büyük bir gerekliliğe sahiptir. Ancak, bu mesleğin içinde bulunmak bazı sağlık risklerini de beraberinde getirebilir. Özellikle taşıt koltuklarında meydana gelen titreşimler, sürücülerin tüm vücut titreşimine maruz kalmasına neden olabilir. Bu nedenle, bu titreşimlerin İş Sağlığı ve Güvenliği mevzuatlarına uygun olarak değerlendirilmesi son derece önemlidir. İş sağlığı ve güvenliği mevzuatlarına göre, işverenler çalışanlarının belirli bir titreşim maruziyeti altında çalışmalarını sağlamakla yükümlüdür. İş yerlerinde çalışanların maruz kaldığı titreşim değerleri, iş sağlığı ve güvenliği yönetmelikleri tarafından belirlenen eylem ve sınır değerleri arasında olmalıdır. Aynı zamanda, taşıt sürücülerinin rahatlığı ve ergonomisi açısından bu titreşimlerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, gerçek bir taşıtın temsili olan teorik bir üç serbestlik dereceli taşıt modeli geliştirilmiştir. Bu model üzerinde farklı yol pürüzlülükleri (beton, asfalt, parke, toprak, stabilize) kullanılarak deneysel yol girdisi sağlanmıştır. Bu şekilde, farklı yol pürüzlülüklerinde taşıt koltuklarında meydana gelen titreşimler, zaman ve frekans tabanında incelenmiştir. Ayrıca, taşıtın dizayn parametrelerinin koltuk titreşim genliklerine olan etkisi, iş sağlığı ve güvenliği mevzuatı kapsamında değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, farklı yol türlerinde ideal bir taşıt modeli tasarlanmıştır. Bu model, tüm yol çeşitlerinde maruziyet sınır değerinin altında kalan koltuk titreşim genliklerine sahiptir. Bu çalışma, taşıt sürücülerinin sağlığını ve konforunu korumak amacıyla mevzuatlara uygun tasarımların ne kadar önemli olduğunu vurgulamaktadır. Taşıt endüstrisindeki bu tür iyileştirmeler hem sürücülerin sağlığını korumak hem de iş sağlığı ve güvenliği standartlarına uymak için hayati bir öneme sahiptir.

Anahtar Kelimeler: İş sağlığı ve güvenliği, koltuk titreşimleri, mesleki maruziyet sınır değeri

Abstract

Driving is an important profession that plays a key role in many sectors. Vehicle drivers are essential in many sectors such as transportation, logistics, public services, courier delivery services and tourism. However, being in this profession can also bring some health risks. In particular, vibrations in vehicle seats can expose drivers to whole-body vibration. Therefore, it is extremely important that these vibrations are assessed in accordance with Occupational Health and Safety legislation. According to occupational health and safety legislation, employers are obliged to ensure that their employees work under a certain vibration exposure. The vibration values to which employees are exposed in workplaces should be between the action and limit values set by occupational health and safety regulations. At the same time, these vibrations need to be taken into account in terms of the comfort and ergonomics of vehicle drivers. In this study, a theoretical three-degree-of-freedom vehicle model is developed to represent a real vehicle. Experimental road input is provided by using different road roughnesses (concrete, asphalt, paving, dirt, destabilized) on this model. In this way, the vibrations occurring in the vehicle seats at different road roughnesses are analyzed in time and frequency domain. In addition, the effect of vehicle design parameters on seat vibration amplitudes is evaluated within the scope of occupational health and safety legislation. As a result, an ideal vehicle model is designed for different road types. This model has seat vibration amplitudes below the exposure limit value on all road types. This study highlights how important it is to design in accordance with legislation to protect the health and comfort of vehicle drivers. Such improvements in the vehicle industry are vital both to protect the health of drivers and to comply with occupational health and safety standards.

Keywords: Occupational health and safety, seat vibrations, occupational exposure limit value

I. GİRİŞ

Titreşim, insan sağlığı, performansı ve konforu üzerindeki fizyolojik ve psikolojik etkilerle birlikte hareket hastalığı gibi etkilere sahiptir. Titreşimin insanlar üzerindeki etkilerini azaltmak amacıyla farklı kuruluşlar ve araştırmacılar uzun süredir çalışmalar yürütmektedirler. Taşıt sürücü koltuğunda meydana gelen ivmeler sürücülerin konforunu önemli ölçüde etkileyebilmektedir. İvme artışı veya azalışının insan sağlığı üzerindeki etkileri matematiksel değerlendirmelere dayalı olarak incelenebilmektedir [1].

İşyerlerinde yürütülen İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) faaliyetleri ile işverenler, çalışanların fiziksel ve ruhsal yönden tam bir iyilik halinde olmalarını sağlamayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda çalışma ortamındaki tehlikelerin ve bu tehlikelerden kaynaklanan risklerin belirlenmesi gerekmektedir. İşverenler belirlenen bu riskleri ortadan kaldıracak veya kabul edilebilir seviyeye getirecek önlemleri İSG mevzuatına uygun olarak almakla yükümlüdür. Bu amaçla işyerlerinde yapılacak risk değerlendirme çalışmaları, işyerine uygun bir risk analiz yöntemi ile detaylı olarak uygulanmalı ve alınması gereken önlemler belirlenmelidir [2-4]. Titreşim maruziyetlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği yönetmeliği açısından incelenmesini ve iş yeri faaliyetlerinin titreşim ve gürültü maruziyeti açısından kontrol altına alınmasını içeren literatürde farklı çalışmalar mevcuttur [5-8].

Titreşim, çalışanların iş yerlerinde kullandıkları makine ve ekipmanlar nedeniyle maruz kaldıkları fiziksel risk faktörlerinden biridir. Yapılan işin türüne göre el-kol veya tüm vücut titreşimine maruz kalırlar. Bu maruziyet sonucunda çalışanlar başta kas iskelet sistemi olmak üzere çeşitli sağlık sorunları yaşayabilmektedir. Özellikle taşıt sürücülerini koltuk üzerinden gelen ve tüm vücudu etkileyen dikey titreşimlere oldukça maruz kalmaktadır [9, 10]. Türkiye'de 2012 yılında yürürlüğe giren 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu uyarınca işverenler, işyerlerinde çalışanların sağlık ve güvenliğini sağlamak amacıyla risk değerlendirmesi yapmakla yükümlüdür. Ayrıca bu kanun uyarınca çıkarılan titreşim yönetmeliğine göre çalışanların maruz kalabilecekleri titreşim türleri sınır değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Yapılan ölçümler ile titreşim maruziyet değerleri belirlenmeli ve uygun olmayan değerler için alınacak önlemler ile bu değerler kabul edilebilir seviyeye indirilmelidir [11].

Tablo 1. İSG yönetmeliği uyarınca maruziyet eylemi ve maruziyet türleri için sınır değerleri [12].

Maruziyet Tipi	Maruziyet Eylem Değeri [m/s^2]	Maruziyet Sınır Değeri [m/s^2]
El-kol titreşimi	2,5	5
Tüm vücut titreşimi	0,5	1,15

Taşıt koltuk titreşim konforunun, farklı yol pürüzlülükleri ve hızlarında nasıl değiştiğini ölçmek için bir dizi test gerçekleştirilmektedir. Elde edilen test verilerine dayanarak, ideal sürücü koltuk titreşime sahip araçlar üretmeye çalışılmaktadır. Farklı üreticilerin araçlarının karşılaştırılması, konfor değerlendirmeleri için kritik öneme sahiptir ve aynı zamanda araçların üretim aşamalarında önemli kararlar alınmasına da yardımcı olmaktadır [13-15].

Seyir durumundaki tüm taşıtlar genellikle yoldan gelen tahrikler nedeniyle titreşim hareketi yaparlar. Bu titreşimler genellikle 0 ile 25 Hz frekans aralığında görülür [16]. Aracın tekerlek sistemleri, yoldan gelen uyarıları aks, gövde yayları ve sönüm elemanları aracılığıyla gövdeye ileterek bu titreşimlere neden olur. Genellikle dört tekerleği olan taşıtların gövdeleri, yatay, düşey, yalpa ve başurma titreşim hareketleri yapabilirler. Aynı zamanda taşıt içindeki kişi ile taşıt gövdesi arasında, koltuk sistemi olarak kabul edilen yaylar ve sönüm elemanları bulunur [17].

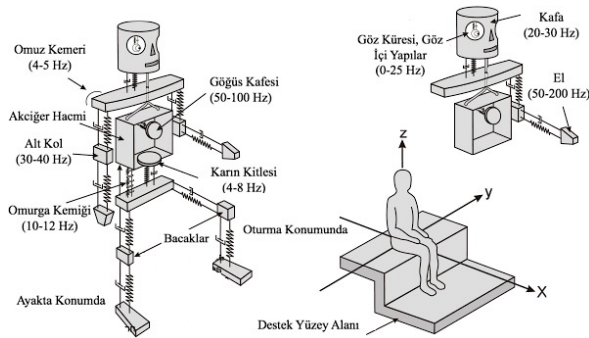
Taşıt tasarım süreci, belirli gereksinimleri ve operasyonel şartları karşılamak zorundadır. Bu gereksinimler temel olarak sürücü ve yolcular için sürüş güvenliği ve sürüş konforunu içerir. Ayrıca bazı standartlara göre tanımlanır, doğrulanır ve test edilir [18-21].

Taşıt sistem dinamiğinin bir girdisi olan yol pürüzlülüğü tekerleğe aktarıldıktan sonra taşıtın elastik parçaları ile aks gövdesine iletilir [22]. Yol pürüzlülüğünün yanı sıra sürüş karakteristikleri ve yol uyarımından gelen titreşim sinyallerinin koltuğa aktarılması için bir karakteristik olan titreşimin iletim yolu sürüşte rahatsızlığa neden olmaktadır. Dikey yöndeki koltuk titreşimlerine karşılık gelen araç konforu, sürücü sağlığını etkileyen önemli bir parametredir. Sürücü koltuğu ile ilgili araç konforunu değerlendirmek için, sürücü koltuğunun zaman alanındaki rms dikey ivme verileri konforun tanımlama parametresi olarak kullanılmaktadır [23]. Dikey koltuk ivme genliklerinin konforlu sürüş üzerindeki etkileri, seçilen aracın matematiksel bir modeli ile araştırılmıştır [24].

Farklı yollar boyunca toplanıp taşıt üzerine aktarılan titreşimler, tekerlek yükü salınımlarına neden olur ve

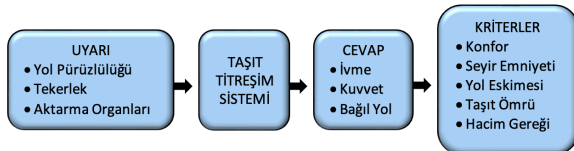
bu, araç tekerleklerinin yol ile etkileşimini değiştirir. Bu etkileşimin sonucunda ortaya çıkan temasın çeşitli sonuçları vardır. Yol ile olan etkileşim yüksekse, yolun aşınması riski artarken, düşükse, seyir güvenliği azalabilir. Yoldan gelen titreşimlerin neden olduğu çeşitli kuvvetler, aracın dayanıklılığını etkiler. Bu etkileme, yol kaynaklı ivmenin büyüklüğüne bağlı olarak aracın ömrünün kısalmasına yol açabilir [25].

Şekil 1'de gösterildiği gibi, insan vücudunun farklı bölgelerinin her birinin kendine özgü doğal frekansları mevcuttur. İnsanların organlarının doğal frekansları ile eşleşen bir zorlama frekansı olduğunda, insan vücudunun belirli bölgeleri rezonans frekansında titreşmeye başlar. Bu fenomen insan sağlığı açısından oldukça tehlikelidir ve meslek hastalıklarına neden olabilmektedir. Sistem rezonansa girdiğinde titreşim genliği sürekli olarak artma eğilimindedir. Artan titreşim genlikleri organların ciddi derecede sarsılmasına ve zarar görmesine neden olabilir. Bu nedenle, taşıtın doğal frekansı ile organların frekanslarının denk gelmemesi hem organların zarar görmemesi hem de taşıt konforu açısından daha iyidir.



Şekil 1. Farklı organların doğal frekansları [26].

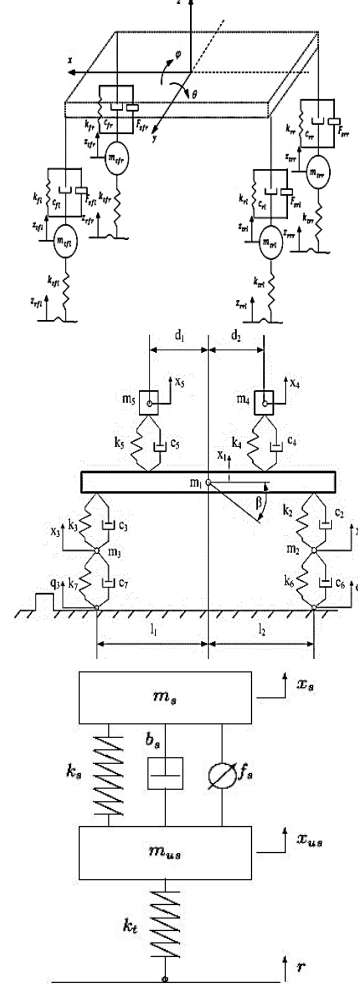
Taşıt dinamik modeli, yalnızca yolun pürüzlülüğü tarafından uyarılmaz. Taşıtta titreşime sebep olan uyarılar Şekil 2'de gösterildiği gibi aynı zamanda tekerlekler ve aktarma organları olabilir. Taşıt dinamik modeline etkileyen ve titreşime sebep olan bu uyarılar taşıt titreşim modeline etki ederek, ivme, kuvvet ve bağıl yol cevaplarına neden olurlar. Elde edilen bu cevaplar değerlendirilerek taşıt, konfor, seyir emniyeti, yol eskimesi, taşıt ömrü ve hacim gereği gibi kriterler ile değerlendirilebilir.



Şekil 2. Taşıt titreşim sistemi blok şeması [27].

Taşıt titreşim modelleri, Şekil 3'te görüldüğü gibi üçe ayrılır: iki izli tam taşıt modeli, tek izli yarım taşıt modeli ve tek boyutlu çeyrek taşıt modeli. Yarım taşıt modeli, tüm taşıt modelinin boyuna ekseninde simetrik kabul edilerek oluşturulmuştur. Taşıt sürücüsü

koltuğunda meydana gelebilecek titreşimleri değerlendirmek için, kolay analiz edilebilirliği nedeniyle çeyrek taşıt modeli en iyi olanakları sunmaktadır. Taşıt dizayn parametrelerinin koltuk davranışı üzerine etkilerini net bir şekilde gözlemek için bu çalışmada çeyrek taşıt modeli kullanılmıştır.



Şekil 3. Örnek taşıt dinamik modelleri a) İki izli tam taşıt modeli b) Tek izli yarım taşıt modeli c) Tek boyutlu çeyrek taşıt modeli [28,29].

Bu çalışmada, İSG mevzuatına uygun olarak yol pürüzlülüğü ve taşıt sürücüsü koltuğu sönümleyici karakteristiğinin konforlu sürüş üzerindeki etkisini araştırmak için üç serbestlik dereceli bir araç titreşim modeli geliştirilmiştir. Taşıtın matematiksel modeli üzerinde farklı parametrelerinin etkileri net olarak gözlenebildiğinden dolayı çalışmada gerçek bir taşıt kullanılmamıştır. Gerçek bir taşıt üzerinde çalışma ve operasyon parametrelerini değiştirmek ve farklı yol pürüzlülüklerine maruziyeti modellemek mümkün olmadığı için çalışmada matematiksel model kullanılmıştır. Kullanılan bu doğrusal matematiksel modelin gerçek taşıtı temsil edebileceği düşünülmektedir. Bu çalışmada, yolcu taşımacılığında kullanılan ve toplu taşıma sistemlerinin önemli bir parçası olan otobüs taşıtı modellenmiştir. Çalışmada kullanılan operasyonel ve dizayn parametreleri gerçek bir otobüsün parametrelerini temsil etmektedir.

Böylece İSG mevzuatına göre taşıt sürücülerinin tüm vücut titreşimleri açısından günlük maruziyet eylem değerlerinin altında konforlu sürüş gerçekleştirmeleri amaçlanmıştır. Geliştirilen taşıt titreşim modeli, doğrusal elastik yay ve sönümleyici elemanlardan oluşmaktadır. Matematiksel modelin girdisi olarak farklı yol tipleri için deneysel olarak elde edilen yol pürüzlülükleri kullanılmıştır. Böylece sistemin gereceğe yakın bir şekilde çalıştırılması amaçlanmıştır. Doğrusal hareket denklemleri, taşıt sürücü koltuğunun RMS ivme verileri gibi zaman serisi yanıtlarını elde etmek için Runge-Kutta zaman adımı entegrasyonu ile çözülmüştür. Böylece, otobüs sürücü koltuğunun frekans ağırlıklı RMS ivme verileri, araç konforunu değerlendirmek için ISO 2631-1'deki frekans ağırlıklı eğri ile belirlenmektedir. Böylece, taşıt sürücü koltuğunda oluşan frekans ağırlıklı RMS ivmeleri kullanılarak taşıt sürücüsünün tüm vücut titreşim maruziyeti, İSG mevzuatındaki Titreşimle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik kriterlerine göre değerlendirilmiştir. İdeal taşıt sürücü koltuğu sönümleyici karakteristiği tanımlanarak meslek hastalığı oluşum riskinden azaltılmıştır.

II. MATERYAL VE METOD

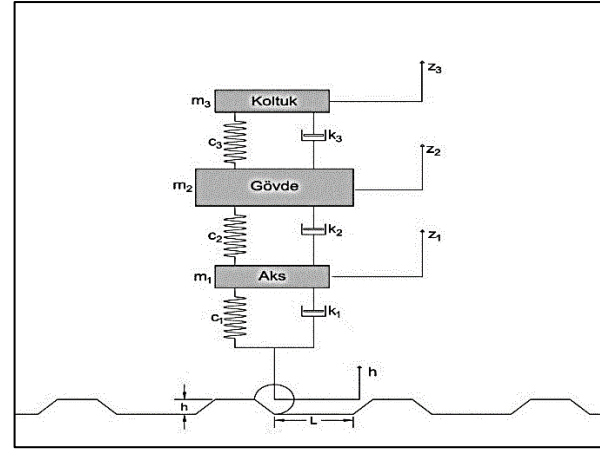
2.1. Üç Kütleli Taşıt Modeli

Bu çalışmada, taşıtın koltuk titreşimlerini incelemek için üç serbestlik dereceli doğrusal bir taşıt modeli oluşturulmuştur. Bu model, taşıtın dinamik hareketini açıklamak için yay, sönüm ve kütle elemanlarının Newton'un ikinci kanununa göre hareket denklemleri kullanılarak oluşturulmuştur. Bu sistemde üç serbestlik derecesi bulunmaktadır: koltuk (m_3), gövde (m_2) ve aksın (m_1) düşey yöndeki hareketleridir. Üç kütleli taşıt titreşim modeli, taşıt sürücü koltuk konforunu incelemek amacıyla oluşturulmuştur. Şekil 4'te gösterilen modelde aşağıdaki bileşenler bulunmaktadır:

- *Koltuk ve Sürücü Ağırlıkları (m_3):* Taşıt modelinin üst sisteminde taşıt koltuğu ve sürücüsünün ağırlıkları kullanılmıştır. Koltuğun sertlik (k_3) ve sönüm (c_3) değerleri bu sistemde yer almaktadır.
- *Gövde (m_2):* Orta bölümdeki sistemde taşıtın gövdesi ve toplam ağırlığı temsil edilir. Bu sistemin eşdeğer sertlik (k_2) ve amortisörlerin eşdeğer sönüm (c_2) değerleri de dikkate alınmıştır.
- *Aks Sistemi (m_1):* Alt taşıt sistemi olan aks sistemi, tekerlek/lastik/aks kütlelerinin eşdeğerini temsil eder. Bu sistem, sertlik (k_1) ve sönüm (c_1) katsayılarıyla ifade edilir. Bu modelde taşıt tekerleğinin sönüm oranı dikkate alınmamıştır ve ihmal edilmiştir.

Şekil 4'teki z_1, z_2, z_3, h sırasıyla aks, gövde, koltuk ve yolun düşey pozisyonlarını göstermektedir. Modelde verilen m_1, m_2, m_3 ise koltuk, gövde ve aks (tekerlek) kütlelerini temsil etmektedir. Bu model, taşıtın düşey yöndeki titreşimlerini analiz etmek ve taşıt konforunu değerlendirmek için kullanılır. Titreşimlerin doğal

frekansları, sertlik ve sönüm değerleri gibi parametreler üzerindeki etkileri incelenebilir. Bu tür analizler, taşıt tasarımı ve konforunun iyileştirilmesi için önemli bilgiler sağlamaktadır.



Şekil 4. Doğrusal taşıt modeli

Üç serbestlik dereceli doğrusal taşıt modelinin hareket denklemleri aşağıda verilmiştir:

$$m_3 \ddot{z}_3 + c_3 (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) + k_3 (z_3 - z_2) = 0 \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 - c_3 (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) - k_3 (z_3 - z_2) + c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_2 (z_2 - z_1) = 0 \quad (2)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 - c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - k_2 (z_2 - z_1) + k_1 z_1 = k_1 h \quad (3)$$

Matris gösterimi şeklinde yazılan versiyonu düşünüldüğünde, M kütle, K yay elemanları, C sönüm elemanları matrisini ve R ise yol tahrik matrisini temsil etmektedir.

$$M = \begin{bmatrix} m_3 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_3 & -k_3 & 0 \\ -k_3 & k_2 + k_3 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_1 + k_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_3 & -c_3 & 0 \\ -c_3 & c_2 + c_3 & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Yukarıdaki verilen dinamik denklemler durum değişkeni vektörleri (z) ile işleme girerek yol tahrik matrisine eşitlenir.

$$M \begin{bmatrix} \ddot{z}_3 \\ \ddot{z}_2 \\ \ddot{z}_1 \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} \dot{z}_3 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_1 \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} z_3 \\ z_2 \\ z_1 \end{bmatrix} = R \cdot h \quad (8)$$

Aşağıdaki denklemlerde, \hat{z} kompleks genliğinin ve \hat{h} kompleks uyarısının gerçel ve sanal kısımları vektörle gösterilmiştir (g: gerçel; s: sanal):

$$\hat{z}^T = (z_g, z_s) = (z_{3,g}, z_{2,g}, z_{1,g} / z_{3,s}, z_{2,s}, z_{1,s}) \quad (9)$$

$$\hat{h}^T = (h_g, h_s) \quad (10)$$

Elde edilen denklemlerin genel gösterimi aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$\begin{vmatrix} K - w^2 M & -wC \\ -wC & K - w^2 M \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} z_g \\ z_s \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_g \\ R_s \end{vmatrix} \cdot h \quad (11)$$

A B

Gerekli düzenlemeler yapıldığında,

$$\hat{z} = A^{-1} \cdot B \cdot \hat{h} \quad (12)$$

$$\frac{\hat{z}}{\hat{h}} = A^{-1} \cdot B \quad (13)$$

$$B^T = (0 \ 0 \ c_1 \ 0 \ 0) \quad (14)$$

Taşıt sisteminin doğal frekansları A matrisinden elde edilebilir. Çalışma kapsamında elde edilen üç serbestlik dereceli doğrusal taşıt modelindeki sönümsüz doğal frekanslar ve sönüm oranları aşağıdaki gibi verilmiştir. Taşıt sürücü koltuğu doğal frekansı (f_3) ve sönüm oranı (D_3):

$$f_3 = \frac{\vartheta_{koltuk}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_3}{m_3}} \quad (15)$$

$$D_3 = \frac{k_3}{2\sqrt{c_3 m_3}} = \frac{k_3}{2m_3 \vartheta_3} \quad (16)$$

Taşıt gövdesi doğal frekansı (f_2) ve sönüm oranı (D_2):

$$f_2 = \frac{\vartheta_{gövde}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_2}{m_2 + m_3}} \quad (17)$$

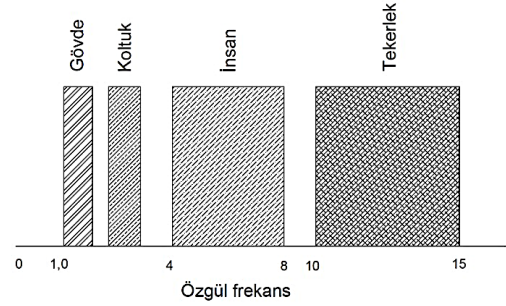
$$D_2 = \frac{k_2}{2\sqrt{c_2 m_2}} = \frac{k_2}{2m_2 \vartheta_2} \quad (18)$$

Taşıt aks bölgesi doğal frekansı (f_1):

$$f_1 = \frac{\vartheta_{aks}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_1 + c_2}{m_1}} \quad (19)$$

Ortalama taşıt parametreleri ile yukarıda dinamik denklemleri verilen taşıt modeli çözüldüğünde, taşıt gövdesi, koltuk ve aks bölgesi doğal frekansları bölgeleri elde edilmiştir. Şekil 5'de bu frekans bölgeleri ve aralıkları gösterilmiştir. Gösterilen frekans bölgeleri

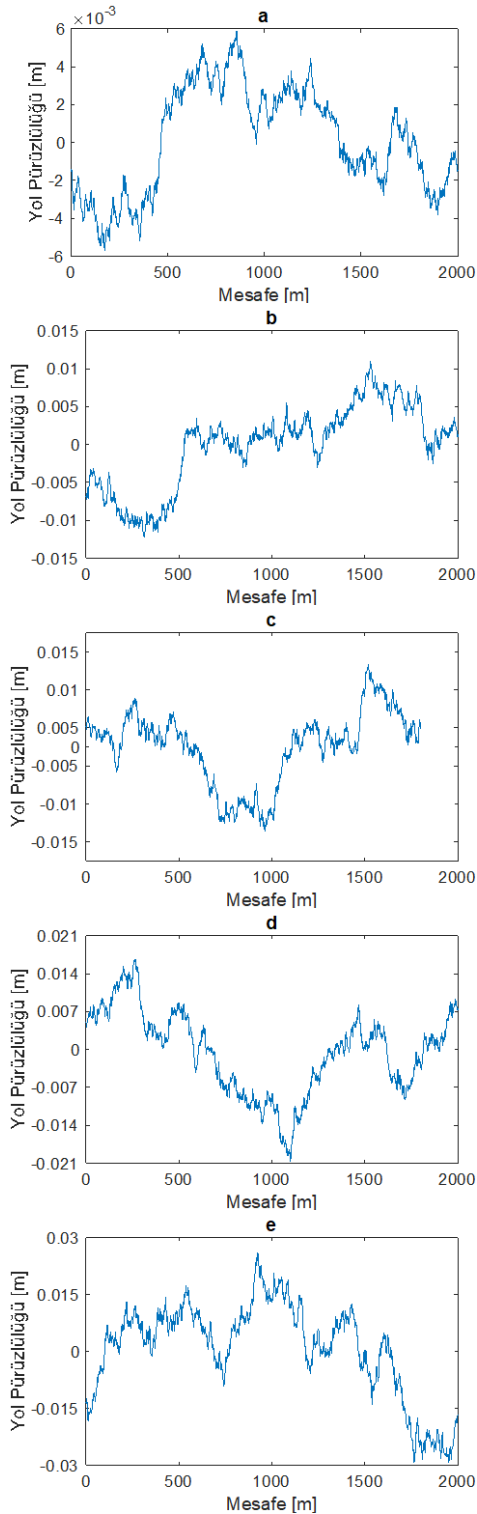
ve aralıkları taşıt gövdesini, koltuğu, insanı ve tekerleği temsil etmektedir. Şekil 5'de verilen bu frekans bölgeleri literatürden elde edilen ve literatür sonuçlarının derlemesi ile tanımlanan frekans aralıklarını temsil etmektedir [16].



Şekil 5. Farklı taşıt kısımları ve insan için doğal frekans bölgeleri (Hz) [16].

2.2. Yol Pürüzlülüğü

Taşıt dinamik modeli açısından en önemli dinamik uyarı, yoldan gelen yol pürüzlülükleridir. Yoldan gelen uyarıların ölçülmesi ve analiz edilmesi, taşıt titreşim analizi için oldukça önemlidir. Önceki bölümde oluşturulan taşıt modeline girdi fonksiyonu olarak yoldan gelen uyarılar tanımlanmıştır. Taşıt modelinde girdi olarak kullanılan yol pürüzlükleri deneysel çalışmalar ile 5 farklı yoldan elde edilmiştir. Beton, asfalt, parke, toprak, stabilize yol çeşitleri seçilerek buralarda ölçümler yapılmıştır. Yol pürüzlülüğü ölçüm mesafesi tüm yol çeşitleri için 2000 m olarak belirlenmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi yol pürüzlülüğünün mesafeye göre grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 6. Farklı yol tipleri için elde edilen yol yüzeyi pürüzlülük profilleri a) Beton yol b) Asfalt yol c) Parke yol d) Toprak yol e) Stabilize yol

2.3. Koltuk Üzerindeki Titreşimlerin RMS İvme Değerinin Hesaplanması

İnsanların tüm vücut titreşimlerine karşı hassasiyeti maruz kaldıkları frekanslara göre değişmektedir. Frekans ağırlıklandırma faktörleri, frekansların insanlar üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Frekans ağırlıklandırma faktörleri ISO 2631-1'de

belirlenmiştir [30]. Bu çalışmada, dikey tüm vücut titreşimleri için W_k frekans ağırlıklandırma eğrisi kullanılmıştır. Taşıt koltuğunun RMS ivmesinin (a_{rms}) matematiksel gösterimi Denklem 20'de verilmiştir:

$$a_{rms} = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [a(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

Yukarıdaki denklemde, $a(t)$ zamanın bir fonksiyonu olarak koltuk ivmesini, T saniye cinsinden ölçüm süresini temsil etmektedir.

W_k frekans ağırlıklandırma eğrisi, koltuğun düşey yöndeki frekans ağırlıklı RMS ivmelerini belirlemek için kullanılmaktadır. Taşıt sürücü koltuğunun frekans ağırlıklı RMS ivmesi ($a_{w,rms}$), aşağıdaki Denklem 21'e göre hesaplanır:

$$a_{w,rms} = \left[\sum_i (W_i a_{rms})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Yukarıdaki denklemde a_{rms} taşıt koltuğunun frekans ağırlıklı RMS ivmelerini, W_i ise ağırlıklandırma faktörünü temsil etmektedir. Titreşim sinyalleri incelenirken, titreşim seviyesini izlemek yerine RMS (Karekök Ortalama Kare) değerini izlemek, birçok durumda daha iyi sonuçlar verebilir. Örneğin, toplanmış bir sinyal içinde tek bir yüksek seviyeli darbe meydana gelebilir. Bu durumda, sinyalin titreşim genliği büyük olabilir, ancak RMS değeri çok fazla değişmeyebilir.

III. ARAYÜZ TASARIMI

MATLAB Graphical User Interface (GUI), kullanıcının aracın dizayn ve çalışma parametre değerlerini girmesine olanak tanır ve ardından sonuçları hızlı bir şekilde elde etmesini sağlar. Bu GUI, farklı araç değerlerini girdiğinizde hızlı iterasyonlar yaparak sonuçları karşılaştırmanıza olanak tanır. Genel olarak, bu MATLAB arayüzü şu öğeleri içerir:

- **Bilgi Giriş Kutucukları:** Kullanıcının aracın parametre değerlerini girebilmesi için kullanılan metin kutuları veya giriş alanlarıdır. Bu kutular, araç için gereken giriş değerlerini almak için kullanılır.
- **Uygulama Butonları:** Giriş değerlerinin hesaplanabilmesi veya işlenebilmesi için kullanılan düğmelerdir. Bu düğmeler, kullanıcının girilen parametrelerle işlem yapmasını sağlamaktadır.
- **Grafik:** Aracın sonuçlarını grafiksel olarak görüntülemek için kullanılan bir grafik alanıdır. Bu grafik, sonuçların görsel olarak analiz edilmesini kolaylaştırmaktadır.
- **Bilgi Sonuç Kutucukları:** Sonuçların sayısal olarak görüntülenebilmesi için kullanılan metin kutuları

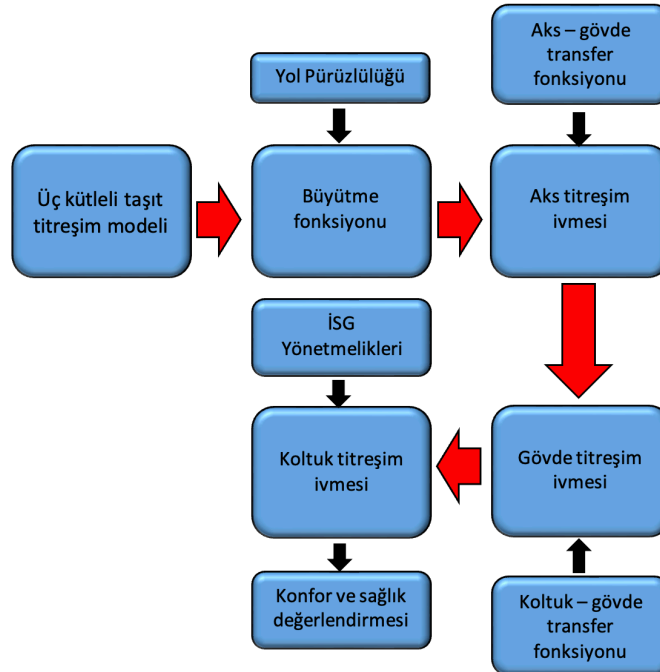
veya çıktı alanlarıdır. Bu kutular, işlem sonuçlarını kullanıcıya sunmaktadır.

Bu MATLAB arayüzü, kullanıcının taşıtlı ilgili farklı senaryoları hızlı bir şekilde değerlendirmesine ve

sonuçları görsel ve sayısal olarak incelemesine olanak tanımaktadır. Bu sayede, aracın performansını optimize etmek veya farklı dizayn parametre değerlerinin etkisini anlamak gibi çeşitli analizler yapılabilmektedir.



Şekil 7. Taşıtlı titreşimlerinin hesaplanması ve analizi için geliştirilen Matlab Arayüzü.



Şekil 8. MATLAB bilgisayar hesaplamaları akış şeması.

Şekil 7'de görülen MATLAB GUI arayüzü, kullanıcının modele giriş yapacak parametreleri tanımladığı bir arayüze sahiptir. Bu parametreler, taşıtlı modelindeki 3 farklı taşıtlı kısmı (koltuk, gövde, aks), 3

farklı elastik eleman sertlik değeri ve 3 çeşit sönüm elemanı katsayısı içermektedir. Bu parametrelerin bazıları taşıtlı kataloglarında bulunabilir, ancak çoğu mevcut araçlardan ölçümle elde edilmelidir. Ayrıca,

kullanıcı taşıt hızını ve yol profilini seçebilir. Yol profilleri A'dan E'ye (A çok iyi beton yol, E çok kötü stabilize yol) farklı yol kalitelerini temsil eder. Sol kısımda bulunan "veri değerlendirmesi" bölümündeki seçeneklere tıkladığımızda, istenilen grafikler orta kısımdaki alanda görüntülenir. Sağ bölümde ise girilen parametre değerlerinin hesaplanması ve sonuçların sonuç kutularında gösterilmesi sağlanır.

Farklı taşıt parametrelerinin de sisteme etkisini inceleyebilmek ve taşıt modelinde oluşan sonuçları hızlı ve etkili bir şekilde İSG mevzuatına göre değerlendirebilmek için MATLAB programı içerisinde bir Graphical User Interface (GUI) arayüzü geliştirilmiştir. Böylece çok farklı tipteki taşıtların (otomobil, kamyon, kamyonet, otobüs, minibüs) dizayn ve çalışma parametrelerini, çalışma kapsamında oluşturulan arayüze girerek etkili sonuçlar alınabilir. Farklı sektörlerde şoförlük yapan taşıt sürücülerin İSG mevzuatına göre tüm vücut titreşim değerlendirmesi yapılabilir. Böylece meslek hastalıkları önlenir. Bilgisayar programı (MATLAB) yardımıyla geliştirilen algoritmanın akış şeması Şekil 8'de detaylı olarak verilmiştir. Bilgisayar programının hesaplama süreci şu adımları içerir:

- *Üç kütleli taşıt titreşim modeli oluşturulması:* İlk adımda, üç serbestlik dereceli doğrusal taşıt modeli oluşturulur. Bu modelde taşıtın koltuk, gövde ve aks gibi farklı kısımları dikkate alınır.
- *Büyütme fonksiyonlarının yol pürüzlülüğü ile çarpılması:* Oluşturulan model kullanılarak, büyütme fonksiyonları hesaplanır. Bu büyütme fonksiyonları, yol pürüzlülüğünün taşıt üzerindeki etkisini gösterir. Koltuk üzerindeki ivme değerleri bu büyütme fonksiyonları ile çarpılarak hesaplanır.
- *Taşıt koltuğundaki rms ivme değerlerinin frekans ağırlık değerleri ile ağırlıklandırılması:* İvme değerleri, frekans ağırlık değerleri kullanılarak (W_k) ağırlıklandırılır. Bu işlemle titreşimlerin frekans bileşenleri dikkate alınır [26].
- *Koltukta meydana gelen titreşimlerin farklı yol pürüzlülükleri için RMS ivmelerinin hesaplanması:* İvme değerleri, farklı yol spektrum yoğunluklarına göre kök ortalama kare (RMS) değerleri hesaplanır. Bu, titreşimlerin farklı yol koşullarına göre nasıl değiştiğini belirlemeye yardımcı olur.

- *Koltuk üzerindeki frekans ağırlıklı sürücü koltuğu RMS ivmelerinin İSG mevzuatına göre sağlık uyarı bölgesindeki yeri hakkında çalışma:* Son adımda, elde edilen RMS ivme değerleri kullanılarak sürücü koltuğunun sağlık uyarı bölgesindeki konumu İSG mevzuatına uygun olarak değerlendirilir. Bu, taşıtın titreşim düzeylerinin iş sağlığı ve güvenliği gerekliliklerine uygunluğunu belirlemek için yapılır.

Bu süreç, taşıt titreşimlerinin sağlık ve güvenlik açısından uygunluğunu değerlendirmek ve gerektiğinde önlemler almak için kullanılan bir bilgisayar programı için temel adımları özetlemektedir.

IV. BULGULAR

Kurulan matematiksel modele girdi olarak 5 farklı yol pürüzlülüğü (beton, asfalt, parke, toprak, stabilize) kullanılarak zaman tabanında analizler yapılmıştır. Taşıt titreşim modelinin doğrusal hareket denklemleri, taşıt sürücü koltuğunun RMS ivme verileri gibi zaman serisi yanıtlarını elde etmek için Runge-Kutta zaman adımı entegrasyonu ile çözülmüştür. Böylece, taşıt sürücü koltuğunun frekans ağırlıklı RMS ivme verileri, İSG yönetmeliği kapsamında değerlendirilmek için ISO 2631-1'deki frekans ağırlıklı eğrileri kullanılarak elde edilmiştir.

Taşıt süspansiyon sistemindeki yay ve sönüm karakteristiklerinin, sürücü koltuğundaki yay, sönüm ve kütle değerlerinin etkilerini incelemek için 7 farklı taşıt modeli oluşturulmuştur. Bu modeller Tablo 2'de gösterilmiştir. Model 1'de belirli bir taşıtın dizayn parametrelerinin yaklaşık değerleri verilmiştir. Model 2'de ise süspansiyon sisteminin yay sertliği artırılmıştır. Model 3'de taşıt süspansiyon sisteminin sönüm katsayısı artırılmıştır. Model 4'de sürücü koltuğundaki yay katsayısı artırılarak daha sert yay kullanılmıştır. Model 5'de ise taşıt sürücü koltuğundaki sönümleyicinin sönümleme katsayısı azaltılarak daha katı davranışlı duruma getirilmiştir. Model 6'da ise taşıt sürücü koltuğunun kütlesi artırılarak koltuğun doğal frekansında düşüşe gidilmiştir. Model 7'de ise ilk 6 modeldeki etkiler incelenerek ideal Model oluşturulmaya çalışılmıştır.

Tablo 2. Farklı dizayn parametrelerini içeren taşıt modelleri.

Taşıt Modelleri	Taşıt Dizayn Parametreleri				
	k_2 [N/m]	c_2 [Ns/m]	k_3 [N/m]	c_3 [Ns/m]	m_3 [kg]
Model 1	300000	20000	25000	1000	137
Model 2	350000	20000	25000	1000	137
Model 3	300000	24000	25000	1000	137
Model 4	300000	20000	35000	1000	137
Model 5	300000	20000	25000	600	137
Model 6	300000	20000	25000	1000	156
Model 7	270000	20000	25000	1400	167

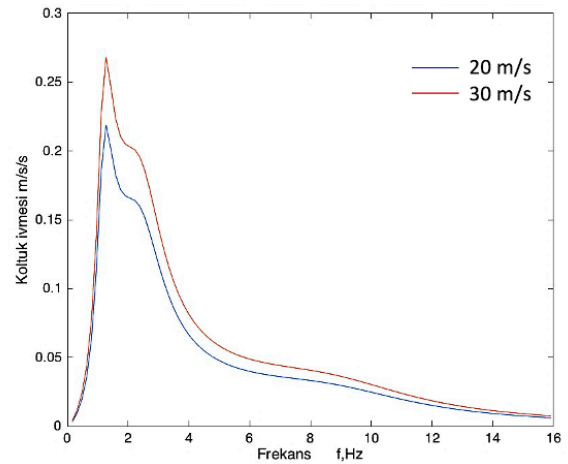
İSG kapsamında “Çalışanların Titreşimle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik” kriterlerine göre yol pürüzlülüğü ve farklı taşıt parametrelerine sahip taşıt modellerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Farklı yol pürüzlülüklerine maruz kalan 7 farklı taşıt modelinin simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar frekans ağırlıklı sürücü koltuğu RMS ivme değerleri olarak Tablo 3’de verilmiştir. İSG yönetmeliğine bağlı olarak, sürücünün maruz kaldığı koltuk titreşimlerinin RMS ivmelerinin 1.15 m/s^2 ’den yüksek olması rahatsız sürüş olarak tanımlanmaktadır ve meslek hastalıklarına neden olabilmektedir [6]. Sürücü koltuk titreşimlerinin RMS ivme değerlerinin 1.15 m/s^2

değerini geçtiği çalışma şartları kırmızı dolgu ile gösterilmiştir. Bu bölgeler İSG yönetmeliği açısından taşıt sürücüsü olarak çalışan meslek gruplarında tehlikeli bölgeler olarak algılanmaktadır. Bu bölgelerde uzun süre araç kullanan çalışanlarda titreşim kaynaklı mesleki hastalıkların görülme ihtimali oldukça fazladır. Tablo 3’deki mavi dolgulu bölgeler ise güvenli sürüş bölgesini temsil etmektedir. İSG mevzuatı açısından 0.5 m/s^2 değerinden daha yüksek RMS ivme değerine maruz kalındığında ise gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Tablo 3’de 0.5 m/s^2 değerini geçen fakat 1.15 m/s^2 değerinin altında kalan sürüş bölgeleri sarı dolgular ile gösterilmiştir.

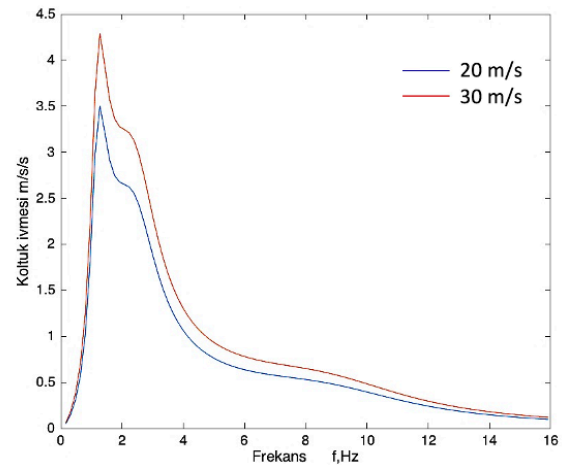
Tablo 3. Frekans ağırlıklı sürücü koltuğu RMS ivme değerleri

Yol Tipi	Taşıt Modelleri						
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7
Beton	0.25	0.43	0.21	0.44	0.51	0.19	0.13
Asfalt	0.57	0.64	0.48	0.71	0.83	0.52	0.36
Parke	0.82	1.17	0.73	1.08	1.19	0.77	0.54
Toprak	1.28	1.41	1.17	1.54	1.73	1.11	0.81
Stabilize	1.33	1.52	1.23	1.72	1.89	1.19	0.95

Model 1’de toprak ve stabilize yolda maruziyet sınır değerine ulaşılrken (1.15 m/s^2), Model 2’de ise parke yolda da bu değere ulaşılmıştır. Model 3 ve 4’de görüldüğü gibi taşıt düzyanındaki süspansiyon sönüm ve koltuk yay karakteristiklerinin değişimi ivme değerlerini etkilese de Model 1’e benzer şekilde toprak ve stabilize yolda maruziyet sınır değerleri geçilmiştir. Model 6’da ise taşıt sürücü koltuğunun artması taşıt sürücü koltuk titreşimlerinin sönümlemesine olumlu bir katkıda bulunmuştur ve sadece stabilize yolda maruziyet sınır değerini geçmiştir. Tüm bu dizayn parametrelerinin etkileri incelenerek, taşıt süspansiyon sistemindeki yay sertliğinin daha düşük, koltuk sönüm değerinin daha yüksek ve koltuk kütlelerinin daha fazla olduğu Model 7 oluşturulmuştur. Model 7’de ise tüm yol şartlarında taşıt sürücüsü maruziyet sınır değerinin altında kalmıştır. Böylece taşıt sürücülerini açısından İSG yönetmeliğine uygun olarak güvenli sürüş tüm yol tiplerinde (beton, asfalt, parke, toprak, stabilize) sağlanmıştır.



Şekil 9. Beton yol için frekans tabanında koltuk ivmesi



Şekil 10. Stabilize yol için frekans tabanında koltuk ivmesi

Beton tipi düşük yol pürüzlülüğüne sahip bir yolda, taşıt hızının iki farklı değere sahip olduğu senaryo için (20 ve 30 m/s) taşıt titreşim modelinin analizleri yapılmıştır ve elde edilen koltuk ivme değerleri gözlenmiştir. Yapılan analizlerde beton tipi çok iyi bir yol ile stabilize yol pürüzlülüğüne maruz kalan taşıtın koltuk ivme değerleri incelenmiştir. Şekil 9'da beton yol için farklı frekans değerlerine karşılık gelen koltuk ivmesi eğrisi gösterilmiştir. Bu eğrilerde, koltuk ve gövde için doğal frekansların etkili olduğu görülmüş, aks gövdesi için ise çok az eğrilik olduğu gözlenmiştir. Şekil 9 ve 10'da görüldüğü gibi ivme genlik değerlerinin lokal tepe noktaları, taşıt koltuğu için 2.51 Hz ve taşıt gövdesi için 1.28 Hz doğal frekanslarında gözlenmektedir. Taşıt aks gövdesinin ise doğal frekansı 9.81 Hz değerinde az eğrilik oluşturarak ortaya çıkmaktadır. Yüksek hızda taşıtın koltuk ivmesinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 10'da ise aynı analizler stabilize yol pürüzlülüğüne maruz kalan taşıt için yapılmıştır. Bu durumda, koltuk ivmesi değerlerinin beton yol analizinin sonuçlarından daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, taşıt hızının artmasıyla koltuk ivme değerlerindeki artışın stabilize yolda da gözlemlendiği görülmüştür.

Sonuç olarak, yolun tipi ve pürüzlülüğü ile taşıt hızının koltuk ivme değerlerine etkisinin önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu analizler, taşıt titreşimlerinin yol koşullarına bağlı olarak nasıl değiştiğini anlamak ve tasarım veya güvenlik önlemlerini optimize etmek için önemli veriler sunmaktadır.

V. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında üç serbestlik dereceli taşıt titreşim modeli teorik olarak oluşturulup, bu modele deneysel olarak elde edilen 5 farklı (beton, asfalt, parke, toprak, stabilize) yol pürüzlülüğü uygulanmıştır. Bu çalışma gerçek bir taşıt ile yapılmamıştır çünkü taşıt dizayn parametrelerindeki değişimin etkisi net olarak gözlemlenememektedir. Bunun yerine, incelemeler taşıt matematiksel modeli üzerinde gözlemlenmiştir. Taşıt dizayn parametrelerinin etkilerini detaylı olarak gözlemlenmesi ve İSG yönetmeliğine uygun maruziyet sınır değerini ($1.15 m/s^2$) geçmeyecek taşıt modeli elde edilmesi amaçlanmıştır. Böylece tüm vücut titreşimine maruz kalma kaynaklı doğacak meslek hastalıklarının önüne geçmek amaçlanmıştır. Çalışmadan elde edilen gözlemlere dayanarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Yol pürüzlülüğünün artması (beton yoldan stabilize yola geçiş) taşıt sürücü koltuğundaki titreşimlerin RMS ivme değerlerini arttırmıştır ve maruziyet sınır değerini geçmesine neden olmuştur.
- Taşıt süspansiyonundaki yay sertliğinin artması konforsuz sürüşe neden olmuştur.

- Süspansiyondaki sönüm değerinin artması frekans ağırlıklı sürücü koltuğu RMS ivme değerlerini azaltarak sürücü açısından olumlu etki sağlamıştır.
- Koltuk yay sertliğindeki artış ve sönüm değerindeki azalış, frekans ağırlıklı sürücü koltuğu RMS ivme değerlerini arttırarak İSG yönetmeliğine göre maruziyet sınır değerinin geçilmesine neden olmuştur.
- Koltuk kütlelerinin artması ivme değerlerini azaltarak güvenli sürüş sağlamıştır.
- Taşıt hızındaki artış frekans tabanında verilen koltuk ivme değerlerinin genliklerinde artışa neden olmuştur.

Sonuç olarak İSG mevzuatı kapsamında verilen maruziyet sınır değerini geçmemek ve sağlıklı iş ortamı sağlanabilmesi için taşıt süspansiyonunun sönüm değerinde, koltuk sönümlenme değerinde ve koltuk kütlelerinde artışa gidilmelidir. Ayrıca, taşıt süspansiyonunun yay sertliği azaltılmalıdır.

İş sağlığı ve güvenliğine uygun olarak titreşimin taşıt sürücüsü üzerindeki etkilerini azaltmak için aşağıdaki önlemler alınabilir;

- Taşıt hızının sınırlandırılması
- Sürücünün ağırlığına göre doğru şekilde ayarlanmış uygun bir süspansiyonlu koltuk sağlanması
- Sürücü koltuğunun sönümleyiciler ile donatılması
- Yeterli dolgu sağlayan ergonomik tasarımlı koltuk ve arkalıkların kullanılması

Uygun gerçek taşıt test ortamı sağlanırsa yapılan bu çalışmalar gerçek bir taşıt üzerinde de yapılabilir. Hidropuls deney sistemi ile gerçek bir taşıta yol pürüzlülüğü girdileri sağlanarak, taşıt farklı yol tiplerinde koşuturulabilir. Sonuç olarak koltuktan üç eksenli ivme ölçer ile veriler toplanarak çalışmanın deneysel analizleri gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Griffin, M. J., The evaluation of vehicle vibration and seats. *Applied ergonomics*, 9(1), 15-21, (1978).
- [2] Hacibektasoglu, S. E., Mertoglu, B., & Tozan, H., Application of a novel hybrid f-sc risk analysis method in the paint industry. *Sustainability*, 13(24), 13605, (2021).
- [3] Hacibektaşoğlu, S. E., Mertoğlu, B. & Tozan, H., Bulanık çok kriterli karar verme yöntemleriyle bir risk analizi uygulaması. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 34 (3), 403-414, (2022).
- [4] Zorlutuna, A. & Kılıç, H. S., İnşaat sektöründeki ergonomik risklerin değerlendirilmesi ve bir uygulama. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 34 (1), 14-26, (2022).
- [5] Doğan, O., madencilik faaliyetlerinde gürültü ve titreşim seviyelerinin iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmesi: örnek bir uygulama.

- Social Sciences Studies Journal*, 9(114), 7731-7738, (2023).
- [6] Çetinkaya, F., & Baykent, G., İşyeri çalışma ortamı koşullarının ergonomik yönden incelenmesi (Örnek: Şekerleme Firması). *Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 1(1), 15-31, (2017).
- [7] Oral, T. Y., & Bekman, F. B., İnsan sağlığı hizmetleri çalışanlarının maruz kaldığı meslek hastalığı etkenlerinin iş sağlığı ve güvenliği kapsamında incelenmesi. *Genel Sağlık Bilimleri Dergisi*, 3(2), 160-178, (2021).
- [8] Doğan, T., Erdem, B., & Duran, Z., Oturma pozisyonunda çalışanların tüm vücut titreşimi maruziyetlerinin belirlenmesinde kullanılan iso2631-1, iso2631-5, bs6841 ve avrupa birliği direktifi (eu) 2002/44/ec'nin karşılaştırılması. *Ergonomi*, 3(2), 108-117, (2020).
- [9] Arıtan, A. E., & Tümer, M., Doğaltaş ocaklarında martopikör kullanımında el-kol titreşim maruziyetinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(4), 57-66, (2018).
- [10] Arıtan, A. E., & Tümer, M., Doğaltaş ocaklarında ekskavatör operatörlerinin tüm vücut titreşim maruziyetinin incelenmesi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(2), 321-330, (2019).
- [11] Lorente-Pedreille, R. M., Brocal, F., Saenz-Nuño, M. A., & Sebastián, M. A., Analysis of metrological requirements in occupational health and safety regulations related to the emerging risk of exposure to vibrations. *Applied Sciences*, 10(21), 7765, (2020).
- [12] Çalışanların Titreşimle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik, *Official Gazette* 28743 (22 August 2013), md. 5/1.
- [13] Kolich, M., & Taboun, S. M., Ergonomics modelling and evaluation of automobile seat comfort. *Ergonomics*, 47(8), 841-863, (2004).
- [14] Da Silva, M. G., Measurements of comfort in vehicles. *Measurement Science and Technology*, 13(6), R41, (2002).
- [15] Corbridge, C., Griffin, M. J., & Harborough, P. R., Seat dynamics and passenger comfort. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 203(1), 57-64, (1989).
- [16] Guney, A., Taşıtlarda Titreşim ve Gürültü, *Lecture Notes*, İTÜ, İstanbul, 3-10, (1992).
- [17] Du, H., Li, W., & Zhang, N., Vibration control of vehicle seat integrating with chassis suspension and driver body model. *Advances in Structural Engineering*, 16(1), 1-9, (2013).
- [18] Uhl, T., Chudzikiewicz, A., & Karpiński, J., Dynamic problems in rail vehicle design. *Archives of Transport*, 12, 57-71, (2000).
- [19] Koziak, S., Chudzikiewicz, A., Opala, M., & Melnik, R., Virtual software testing and certification of railway vehicle from the point of view of their dynamics. *Transportation Research Procedia*, 40, 729-736, (2019).
- [20] Lovska, A., & Fomin, O. A new fastener to ensure the reliability of a passenger car body on a train ferry. *Acta Polytechnica*, 60(6), (2020).
- [21] Lovska, A., Fomin, O., Horban, A., Radkevych, V., Skok, P., & Skliarenko, I., Investigation of the dynamic loading of a body of passenger cars during transportation by rail ferry. *Eureka: physics and engineering*, (4), 91-100, (2019).
- [22] Gillespie, T. D., Heavy Truck Ride, University of Michigan Transportation Research Institute, *SAE SP-607*, Ann Arbor, Michigan, (1985).
- [23] Karen, İ., Kaya, N., Öztürk, F., Korkmaz, İ., Yıldızhan, M., & Yurttaş, A., A design tool to evaluate the vehicle ride comfort characteristics: modeling, physical testing, and analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(5-8), 755-763, (2012).
- [24] Dragan, S., & Vlastimir, D., The effect of stiffness and damping of the suspension system elements on the optimization of the vibrational behaviour of a bus. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 1(4), 231-244, (2011).
- [25] Yay, K., & Ereke, İ. M., Hızlandırılmış taşıt ömür testlerinde yol verisi kullanımına yeni bir yaklaşım. *İTÜDERGİSİ/d*, 2(5), (2010).
- [26] Pavic, A., & Reynolds, P., Vibration serviceability of long-span concrete building floors. Part 1: Review of background information. *Shock and Vibration Digest*, 34(3), 191-211, (2002).
- [27] Yavuz, A., & Guney, A., optimization of suspension characteristics for increasing expected daily exposure durations in vehicles according to ISO 2631-1 standard using genetic algorithms. *In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 259(3), 6225-6234, (2019).
- [28] Zhu, Q., & Ishitobi, M., Chaotic vibration of a nonlinear full-vehicle model. *International Journal of Solids and Structures*, 43(3-4), 747-759, (2006).
- [29] Robert, F., The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks, Swets Zeitlinger, Lisse, The Netherlands, (2000).
- [30] ISO-2631-1 Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration Part 1: General Requirements, International Organization for Standardization, Switzerland, (1997).

Glukoz Sensörü Olarak Kullanılmak Üzere İndirgenmiş Grafen Oksit Katkılı Polimerik Film Eldesi

The Production of Reduced Graphene Oxide Based Polymeric Film for the Glucose Detection

Neslihan ALEMDAR¹ 

¹Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul Türkiye

Öz

Bu çalışmada, hidrojel bazlı enzimsiz bir glukoz sensörü üretmek amacıyla aljinatın sodyum tuzu (SA), hyalüronik asit (HA) ve jelatin (Jel) doğal polimerlerinden oluşturulan yapı (SA:HA:Jel) içerisine %0 dan % 50'ye kadar değişen miktarlarda RGO enkapsüle edilerek iletken bir film üretilmiştir. FT-IR analiziyle elde edilen ürünlerin yapıları karakterize edilirken, şişme testi ile de RGO miktarının polimerik filmin su absorblama kapasitesine etkisi incelenmiştir. İletkenlik ölçümlerinde en yüksek iletkenlik değerine (4×10^{-5} S/cm) %30 RGO içeren üründe ulaşılmıştır. RGO katkılı SA:HA:Jel hidrojelinin sensör performansı ve elektrokimyasal aktivitesi döngüsel voltametre (CV) ile araştırıldığında, artan glukoz konsantrasyonuna göre akım değerlerinin yükseldiği ve ortamdaki glukoz miktarı toplam 100 μ L (2×10^{-4} M) olduğunda ise kararlı hale ulaşıldığı belirlenmiştir. Tüm bu sonuçlar, RGO katkılı SA:HA:Jel polimerik filmin, gelecek çalışmalarda glukoz algılaması için elektrokimyasal sensör olarak kullanılabilir potansiyel bir aday olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Sodyum Aljinat, Hyalüronik Asit, Jelatin, Glukoz, Biyosensör

Abstract

In current study, hydrogel based non-enzymatic biosensor for glucose detection was produced by incorporating reduced graphene oxide (RGO, 0%, 10%, 20%, 30% and 50% v/v) into the polymeric structure composing of sodium alginate (SA), hyaluronic acid (HA) and gelatin (Gel). The structure of the obtained products was characterized by FT-IR analysis. The effect of RGO amount on the water uptake capacity of the polymeric films was investigated by swelling test. The maximum conductivity value (4×10^{-5} S/cm) was obtained in the 30% RGO based (SA:HA:Gel) polymeric film. Cyclic voltammetry (CV) method was used for evaluation of the obtained hydrogel's sensor behaviour and electrochemical activity. It was observed that the current values raised by increasing glucose concentration in the PBS medium and when the total glucose amount was 100 μ L (2×10^{-4} M) in the PBS medium, CV response was achieved to the steady state. All results showed that RGO based (SA:HA:Gel) might be served as a promising potential for the non-enzymatic (electrochemical) glucose detection in the future studies.

Keywords: Sodium Alginate, Hyaluronic Acid, Gelatin, Glucose, Biosensor

1. GİRİŞ

Kronik şeker hastalıkları dünyada en yaygın ölüm sebeplerinden biridir ve bu sebeple son yıllarda glukoz miktarının ölçülmesine ve bu hastalıkla ilgili şikayetlerin azaltılmasına yönelik olarak önemli çalışmalar yapılmaktadır. Glukoz ölçümü için, enzim bazlı sensörlere kıyasla elektrokimyasal sensörler yüksek orandaki tekrarlanabilirlik, seçicilik, hızlı cevap verme, uzun süreli stabilite özellikleri ve düşük maliyetleri sebebiyle daha fazla dikkat çekmektedir. Bu tip (enzimsiz) biyosensörler glukozu elektrot yüzeyi üzerinde enzim kullanmadan direkt olarak okside ederek çalışmaktadırlar [1-3].

Hidrojel bazlı elektrokimyasal biyosensörler yüksek oranda gözenekli yapıları ve yüzey alanları sayesinde bir yandan suda çözünen moleküller için geçirgenlik özelliği gösterirken bir yandan da küçük moleküllerin ve iyonların transferlerini desteklerler. Ayrıca biyoyoumlulukları ve stabiliteyi hedeflenen

biyomolekülü algılamak için elektrot ve elektrolit arasında mükemmel bir arayüzey sağlar. Hidrojeller iletken malzemelerle birleştirilerek iletken, oldukça gözenekli, suyu seven bir ağ yapısı elde edilir ki bu da hidrojel içerisinde elektronların hareketliliğini artırır ve böylece elektrokimyasal algılama oldukça çabuklaşır [4,5].

Bu çalışmada elektrokimyasal glukoz sensörü üretmek üzere aljinatın sodyum tuzu (SA), hyalüronik asit (HA) ve jelatin (Jel) doğal polimerlerinin oluşturduğu çaprazbağlı yapı içerisine indirgenmiş grafen oksit (RGO)

katılarak iletkenlik özelliğine sahip bir hidrojel elde edilmiştir. Bu formülasyonda doğal polimerlerden biri olarak sodyum aljinat seçilmiştir. Çünkü suda kolaylıkla çözünebilen aljinat, Ca^{2+} gibi iki değerli iyonlar varlığında hidrojel oluşturabilmektedir. Redoks tepkimeleri, elektrostatik ve iyonik etkileşimler sayesinde metal iyonlarıyla bağ kurabilmektedir. Ayrıca molekül ağırlığının yüksek olması, biyokarallığı ve biyouyumlu yapısı aljinatın biyosensör uygulamalarında kullanılmasına olanak sağlamaktadır. [6-8]. Polimerik yapının diğer bir bileşeni olan hayalüronik asit, düz, dallanmamış, kendini tekrarlayan, glukoronik asit ve asetilglukozaminden oluşan yüksek molekül ağırlıklı doğal bir polisakkarit olup biyouyumluluğu, kararlılığı, viskoelastik ve hidrofilik özellikleri ile güvenle kullanılacak bir malzemedir. [9-10]. Jelatin ise özellikle jel ve film oluşturma özelliklerinden dolayı bu formülasyonda diğer bir komponent olarak seçilmiştir. Jelatin bir kolojen çeşidi olup yapısında kolajende olduğu gibi tekrarlayan aminoasit dizileri bulunmaktadır. Jelatin özellikle doğal yapısı, biyouyumluluğu ve toksik olmamasının yanısıra biyobozunur olması, çeşitli tekniklerle proses edilebilmesi ve iyi mekanik özellikleri sebebiyle biyomedikal uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. [11-13]. Bu üç doğal polimerden oluşturulan polimerik yapıya (SA:HA:Jel) iletkenlik özelliği vermesi için RGO tercih edilmesinin sebebi ise hibritleşmiş SP^2 karbon sistemi (balpeteği şeklindeki latis yapısı) sayesinde GO ya kıyasla daha yüksek iletkenlik özelliği kazandıracak olmasıdır [14]. RGO nun diğer bir önemli avantajı daha geniş yüzey alanı sebebiyle daha fazla mekanik dayanıklılık sağlamasıdır [15]. Geliştirilen bu formülasyonda SA:HA:Jel üçlüsü, RGO'nun topaklanmadan homojen bir şekilde yapı içerisinde dağılmasını ve böylece sensör performansının iyileşmesini sağlarken, RGO'da glukoz duyarlılığı için glukozun oksidasyonunda ideal bir platform oluşturur ve etkili bir şekilde elektron transferine olanak sağlar.

Elde edilen RGO katkılı polimerik filmlerin yapıları FT-IR analiziyle doğrulanırken, hidrofilik özelliklerinin ise artan RGO miktarıyla azaldığı görülmüştür. En uygun iletkenlik değerinin elde edilebilmesi için polimerik matrikse değişen oranlarda RGO entegre edilmiş ve en yüksek iletkenlik değeri %30 RGO katkılı filmde elde edilmiştir. RGO katkılı (SA:HA:Jel) hidrojelinin glukozu algılama performansı döngüsel voltametre (CV) ile incelendiğinde, artan glukoz konsantrasyonuna karşı elektrokimyasal aktivite gösterdiği gözlemlenmiştir. Tüm bu sonuçlar dikkate alındığında RGO katkılı (SA:HA:Jel)' in ileride yapılacak olan detaylı çalışmalarla glukoz için elektrokimyasal bir sensör olarak kullanılabileceği öngörülmektedir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Sodyum aljinat (SA, medikal sınıf, vizkosite 250 cps, 25 °C), jelatin (Jel, medikal sınıf, 280–320 bloom, Tip

A), hayalüronik asit (HA, $M_w=8 \times 10^5$ Da) ve 1-etil-(3-3-dimetilaminopropil karbodimid (EDC) maddeleri Heze Better Biochemical Co., Ltd. (Çin) firmasından satın alındı. Grafit (toz < 20 μ m, sentetik), hidrazin (35 wt. & H₂O) Sigma Aldrich firmasından temin edildi. D-(+)-glukoz ($\geq 97.5\%$), hidroklorik asit (HCl), potasyum nitrat (KNO₃), etanol (EtOH), hidrojen peroksit (H₂O₂), potasyum permanganat (KMnO₄) ve sülfürik asit (H₂SO₄) (98 %) Merck firmasından satın alındı.

2.1 Grafen Oksit Eldesi

Grafen Oksit (GO), grafit tozu kullanılarak modifiye Hummers yöntemi ile elde edilmiştir. İlk olarak 1 g grafit tozu ve 0,5 g potasyum nitrat (KNO₃) buz banyosuna yerleştirilmiş reaksiyon balonuna alındı ve üzerine konsantre sülfürik asitten (H₂SO₄) 23,3 ml yavaş yavaş ilave edildi. Karışım 15 dakika boyunca karıştırıldıktan sonra sürekli karıştırma işlemi uygulanarak 3 g potasyum permanganat (KMnO₄) yavaş yavaş ilave edildi. Bu işlemlerden sonra 35 °C sıcaklıkta kum banyosu hazırlandı. Karışımın bulunduğu reaksiyon balonu kum banyosuna yerleştirildi ve 30 dakika boyunca karıştırıldı. Daha sonra karışıma 50 ml distile su ilave edildi ve sıcaklığı 90 °C'ye çıkarılarak 15 dakika boyunca karıştırıldı. Ardından 167 ml distile su ilave edildi ve 10 dakika boyunca karıştırıldı. 5 ml %30'luk hidrojen peroksit (H₂O₂) dikkatli bir şekilde reaksiyon balonuna eklendi ve 5 dakika boyunca karıştırıldı.

Hazırlanan sıcak karışım eşit miktarda konik ependorf tüplere aktarıldı ve santrifüj cihazına yerleştirildi. 4500 rpm hızda 15 dakika santrifüj işlemi gerçekleştirildi. Santrifüj işlemi sonucu tüplerin içinde üst kısımda oluşan sıvı kısım atılarak kalan katı kısım %10'luk hidroklorik asit (HCl) ilave edildikten sonra tekrar santrifüj edildi. Bu işlem iki kere tekrarlandı. Tüplerin içinde bulunan katı kısım petri kabına alındıktan sonra kurutma işlemi için 48 saat boyunca 65 °C etüve yerleştirildi [16].

2.2 İndirgenmiş Grafen Oksit (RGO) Eldesi

Bir önceki adımda elde edilen grafen oksit petri kabından erlene aktarıldı ve içerisine 200 ml distile su ilave edildi. Erlen ultrasonik banyoda koloidal GO süspansiyonu elde etmek için 15 dakika boyunca bekletildi. Grafen oksitin indirgenebilmesi için damla damla olacak şekilde 2 ml hidrazin ilave edildi ve 100 °C'de 24 saat boyunca karıştırıldı. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra oda sıcaklığına soğutuldu ve süzme işlemi yapılarak indirgenmiş grafen oksit elde edildi. Elde edilen partiküller önce 100 ml metanol ile daha sonra 100 ml distile su ile yıkandı. Bu işlemler tamamlandıktan sonra RGO petri kabına alındı ve 72 saat boyunca vakum etüvünde oda sıcaklığında kurutuldu [16].

2.3 RGO Katkılı Polimerik Film Üretimi

RGO katkılı iletken hidrojel çözücü uzaklaştırma yöntemi ile üretildi. Bunun için öncelikle SA, HA ve Jel, saf suda 5 g/L olacak şekilde ayrı ayrı çözüldü. Daha sonra hacimce %45 SA, %10 HA ve %45 Jel olacak şekilde bir polimer çözeltisi oluşturuldu ve manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Diğer yandan RGO nun etanol içerisinde ağırlık/hacimce %0.1 lik stok çözeltisi hazırlandı ve bu stok çözeltisinden hacim/hacimce %10 olacak şekilde bir önceki adımda hazırlanan polimer karışımına eklendi ve karıştırılmaya devam edildi. Bu karışıma , çaprazbağlayıcı olarak kullanılan EDC nin etanol içerisinde hazırlanmış çözeltisinden (% 0.5 ağırlık/hacim) 5 ml eklendi. Nihai karışım petri kabına dökülerek 3 gün boyunca 37 °C’de kurutuldu.

Saf filmlerin elde edilmesi sırasında yukarıda detayları verilen prosedür aynen uygulanmış olup RGO eklenmesi adımı gerçekleştirilmemiştir.

2.4 Karakterizasyon

Elde edilen GO, RGO, saf film ve RGO katkılı iletken film numunelerinin yapıları FT-IR (Perkin Elmer Spectrum One FT-IR with attenuated total reflectance (ATR)) analizi ile 450 ile 4000 cm^{-1} aralığında tarama yapılarak karakterize edilmiştir.

2.5 Polimerik Filmlerin Su Absorblama Kapasitelerinin Belirlenmesi

Hazırlanan filmlerin su absorblama kapasiteleri için gravimetrik yöntem kullanıldı. Bunun için, saf ve RGO içeren filmlerden yaklaşık aynı miktarlarda örnekler kesilerek kuru tartımları alındı. Alınan örnekler, falkon tüplerde 10 ml saf su içerisinde konuldu. Hazırlanan numuneler çalkalayıcıda 24 saat boyunca 130 rpm ve 37°C’de bekletildi. 24 saat sonunda yaş tartımları alındı. Alınan veriler, Eşitlik (1)’de kullanılarak şişme oranları hesaplandı.

$$SR = \frac{W_s - W_0}{W_0} * 100 \quad (1)$$

2.6 Polimerik Filmlerin İletkenlik Ölçümlerinin Yapılması

Filmlerin iletkenlik ölçümleri 4-Prob (Lucas Labs S-302 Four Point Resistivity Probing Equipment) yöntemi kullanılarak yapıldı. Bunun için saf ve RGO içeren filmlerden iletkenlik ölçümü için numuneler alındı ve bu numunelere 4-Prob cihazında sabit akım değerleri uygulandı. Akım ve voltaj verilerine göre Eşitlik (2) ile üretilen filmlerin dirençleri belirlendi. Daha sonra bu değerler Eşitlik (3)’de kullanılarak numunelerin iletkenlikleri hesaplandı.

$$\rho = \frac{\pi \times t}{\ln 2} \frac{V}{I} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho} : \text{iletkenlik} \left(\frac{S}{\text{cm}} \right) \quad (3)$$

Bu formüllerde yer alan simgeler ρ : direnç (ohm.cm^2), V: voltaj (volt), I: akım (amper), t: filmin kalınlığını göstermektedir.

2.7 Elektrokimyasal Ölçümlerle Sensör Performansının Belirlenmesi

Elde edilen RGO katkılı iletken filminin elektrokimyasal glukoz sensörü olarak performansının ölçümleri için döngüsel voltmetre (CV) (GAMRY Instruments, Reference 600 Potentiostat/Galvanostat/ZRA) kullanılmıştır. 25 °C de ve azot atmosferinde gerçekleştirilen ölçümler 3 elektrot konfigürasyon temelinde ve fosfat tamponu (PBS) ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümde Ag/AgCl referans elektrot olarak kullanılırken, platin tel ise karşı elektrot olarak kullanılmıştır. RGO katkılı polimerik film ise çalışma elektrodu olarak kullanılmıştır. Algılama (sensör) ölçümlerinden önce elektrodun redoks aktivitesini gözlemleyebilmek için glukoz içermeyen PBS çözeltisi blank olarak kullanılmıştır. PBS de hazırlanmış 2×10^{-4} M glukoz stok çözeltisinden belirli miktarlarda alınarak 5 ml PBS içerisine kademeli olarak eklenmiştir. Elektrotun, ortama eklenen glukoz ile etkileşmesi ve buna bağlı olarak verdiği cevap CV analiziyle belirlenmiştir.

III. TARTIŞMA VE SONUÇ

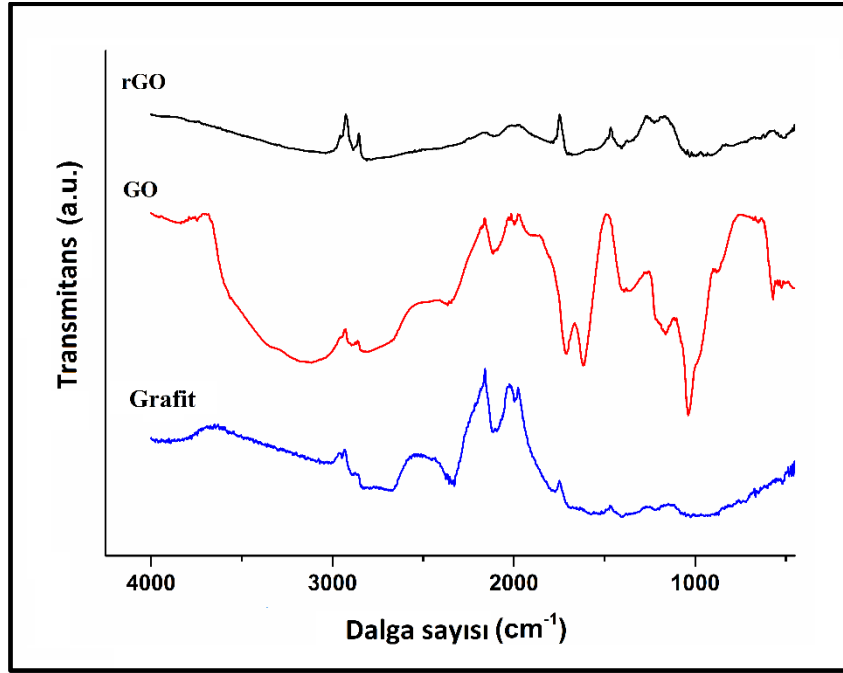
3.1 Karakterizasyon

Öncelikle ilk olarak grafiten GO, GO’dan da RGO’nun başarılı bir şekilde elde edildiğinin ispatı için grafit, GO ve rGO’nun yapıları FT-IR analizi ile doğrulandı. Şekil 1’de görüldüğü üzere grafitin FT-IR spektrumunda, oksijen içeren fonksiyonel gruplara ait herhangi bir pik gözlemlenmezken, GO’nun spektrumunda 1708 cm^{-1} (C=O gerilmesi) , 1163 cm^{-1} (C-O-C gerilmesi) ve 1038 cm^{-1} (C-O gerilmesi) de ortaya çıkan piklerin hepsi oksijen içeren fonksiyonel gruplara aittir. Bu durum, grafitin başarılı bir şekilde oksidasyonunu ve GO’ya dönüştürüldüğünü doğrulamaktadır [17-19]. 3114 cm^{-1} de görülen pik ise yine GO’nun diğer bir karakteristik piki olan O-H’a aittir [18].

RGO’nun spektrumunda ise, oksijen içeren fonksiyonel gruplara ait piklerin azalması ve ortadan kalkması GO’nun indirgenerek RGO’ya dönüştüğünü göstermektedir [20,21]. C-O-C ve C=O gerilmelerine atfedilen pikler RGO örneğinde hemen hemen tamamen kaybolurken, C-O gerilim pikinin yoğunluğunda oldukça azalmıştır. İndirgenme prosesinin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini gösteren

diğer önemli bir kanıtta $3000\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ 'de yer alan hidroksil gruplarına ait piklerin azalmasıdır. RGO'nun spektrumunda oksijen içeren fonksiyonel gruplara ait

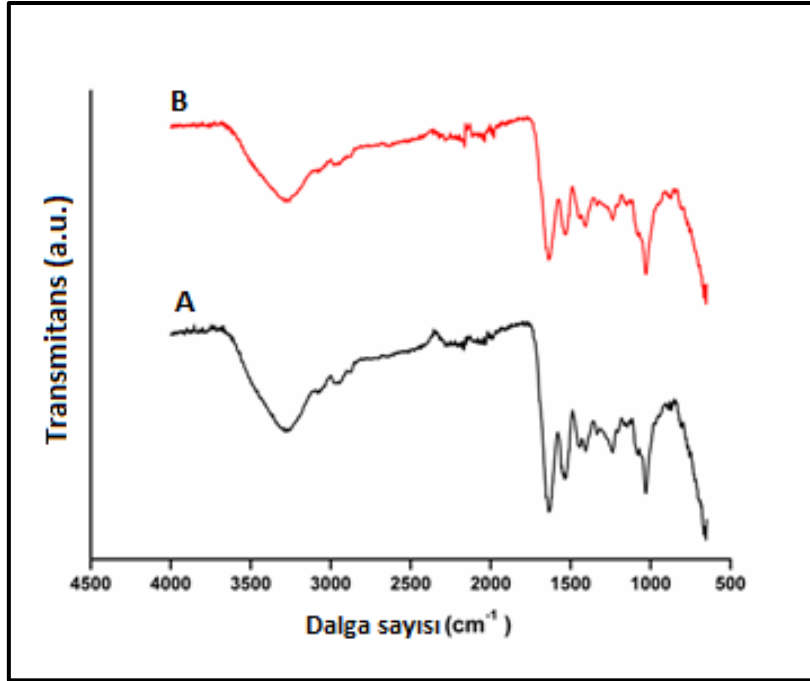
piklerin tamamen ortadan kalkmaması, RGO'da bu tür grupların bir miktarda olsa indirgenmeden kaldığını göstermektedir [22].



Şekil 1. Grafit, GO ve RGO'ya ait FT-IR spektrumları

İkinci olarak saf ve RGO katkılı polimerik filmlerin yapıları FT-IR analizi ile karakterize edilerek, RGO'nun polimerik yapı içerisine enkapüle edilebildiği gösterilmiştir (Şekil 2). 1027 cm^{-1} deki pik sakkarit yapısındaki C-O-C gerilmelerini göstermektedir [23]. 1637 ve 1538 cm^{-1} deki pikler ise sırasıyla polimerik film yapısındaki C=O ve C-N gerilmelerine atfedilebilir [24]. 1406 cm^{-1} deki pik ise hayalüronik asit yapısındaki (COO⁻) karbonil

gruplarının gerilmelerinden kaynaklanmaktadır. RGO'nun polimerik matrikse katılmasıyla 1650 ve 1580 cm^{-1} 'deki piklerin yoğunluğu, polimerik yapı ve RGO'nun fonksiyonel grupları arasındaki etkileşimlerden dolayı azalmıştır. Ayrıca RGO'da bulunan aromatik iskelet yapısının 1600 cm^{-1} 'deki karakteristik absorpsiyon bandı polimerik matriksin (SA:HA:Jel) pikleri ile çakışmıştır.

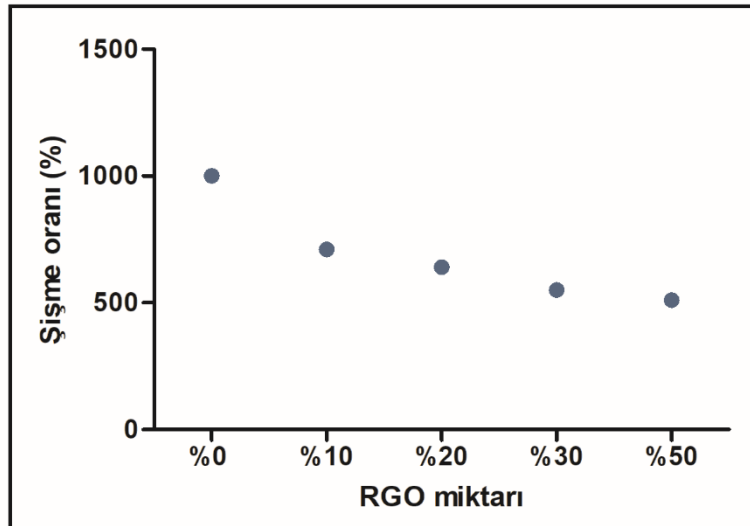


Şekil 2. FT-IR spektrumları A) RGO katkısız (SA:HA:Jel) B) RGO katkılı (SA:HA:Jel)

3.2 RGO'nun Gel:SA:HA Polimerik Filmin Şişme Kapasitesine Etkisi

RGO miktarının polimerik filmin şişme kapasitesine etkisi incelendiğinde, Şekil 3'te verildiği üzere RGO miktarının artmasıyla su absorplama kapasitelerinin azaldığı görülmüştür. Bu olay, polimerik matriks

içerisindeki boşlukların bir kısmının RGO ile dolması sebebiyle su moleküllerinin yapıya girebileceği serbest bölgelerin azalması ile izah edilebilmektedir. Ayrıca, polimeri oluşturan yapı ile RGO arasında meydana gelen etkileşimler sonucunda oluşan fiziksel bir çapraz bağlanmada şişme kapasitesindeki azalmanın diğer bir sebebi olarak sunulmaktadır [25].



Şekil 3. RGO miktarının (SA:HA:Jel) polimerik filmlerin şişme oranına etkisi

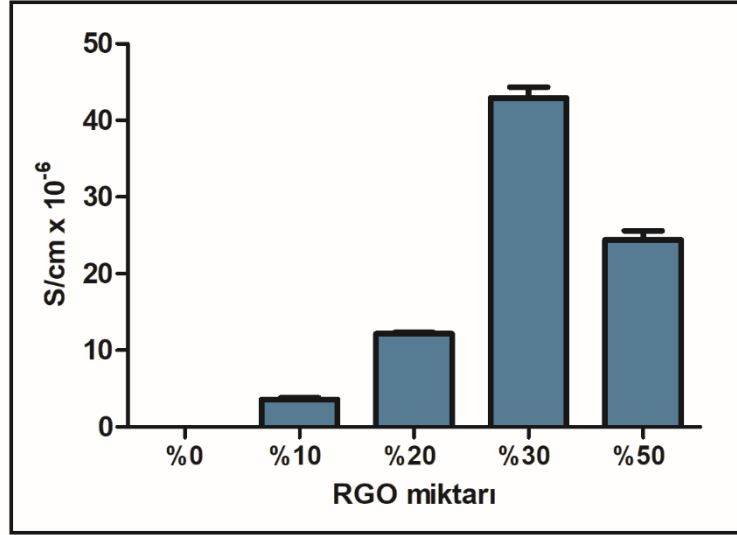
3.3 RGO'nun (SA:HA:Jel) Polimerik Filmin İletkenliğine Katkısı

RGO, yapısındaki SP² hibrit yapısı sayesinde elektronlara geçiş yolu oluşturduğu için, entegre

edildiği polimerik filme iletkenlik özelliği kazandırmıştır. Şekil 4'den görüldüğü üzere RGO miktarının % 10'dan % 30'a kadar artan miktarıyla iletkenlik değerleri yükselirken, %50 oranında RGO kullanıldığında iletkenlik değerinde azalma

görülmüştür. Bunun sebebi, i) RGO miktarı belirli bir dereceye kadar arttığında RGO moleküllerinin birbirlerine oldukça yaklaşması ve böylece elektron hareketliliğin ve iletkenlik özelliğinin artması ii) RGO miktarının çok fazla olması durumunda RGO'ların

topaklanmaya başlaması, polimerik yapı içerisinde homojen bir şekilde dağılamaması ve elektron iletimi için düzlemsel yapının elimine edilmesi ile açıklanabilir.

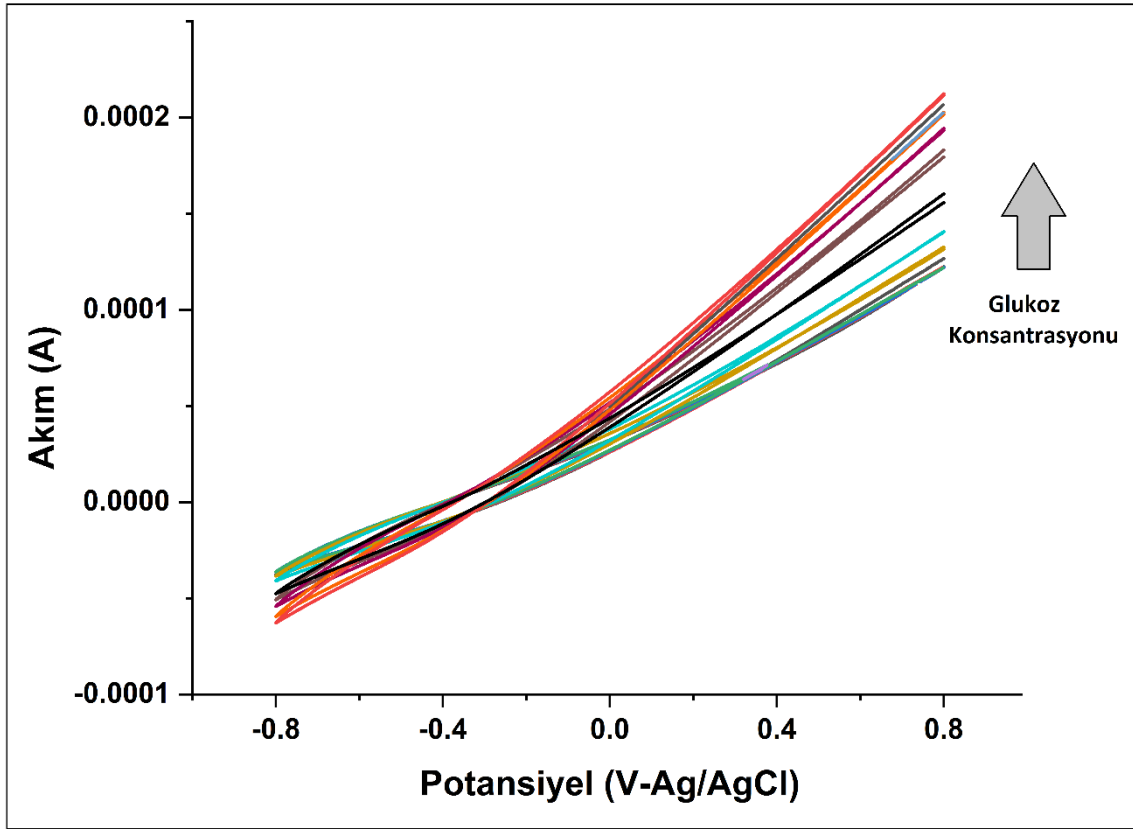


Şekil 4. RGO katkılı (SA:HA:Jel) polimerik filmlerin iletkenlik özelliklerine RGO miktarının etkisi

3.4 RGO Katkılı (SA:HA:Jel) Polimerik Filmin Elektrokimyasal Aktivitesi ve Sensör Performansı

Elde edilen RGO katkılı polimerik filmlerin glukozu karşı elektrokimyasal davranışları -0.80 ile +0.80 V aralığında üçlü elektrot sisteminde 100 mV/s tarama hızında döngüsel voltmetre (CV) ile tespit edilmiştir. Sistemde RGO katkılı polimerik filmler çalışma elektrodu olarak kullanılırken, platin tel yardımcı elektrot Ag/AgCl ise referans elektrot olarak kullanılmıştır. Tüm testler PBS ortamında

gerçekleştirilmiştir. RGO katkılı polimerik filmlerin glukozu karşı elektrokimyasal davranışları ortama sırasıyla 10 µL, 20 µL, 30 µL, 40 µL, 50 µL ve 100 µL (2×10^{-4} M) glukoz çözeltisi eklenerek yapılmıştır. Şekil 5'de görüldüğü üzere ortamda artan glukoz konsantrasyonuna bağlı olarak pozitif potansiyellerde akım artışı gözlenmiş olup . Akım artışı glukoz derişimi 100 µL (2×10^{-4} M) olana kadar devam etmiş ve kararlı hale ulaşmıştır. Bu davranış RGO katkılı polimerik filmin 10-100 µL (2×10^{-4} M) aralığındaki glukozu karşı elektroaktif davranış sergilediğini göstermektedir.



Şekil 5. RGO katkılı (SA:HA:Jel) polimerik filmin (hidrojelin) PBS ortamında artan glukoz konsantrasyonuna karşı döngüsel voltametre cevapları

IV. SONUÇ

Günümüzde yaygın olarak görülen şeker hastalıklarının tedavisinde kullanılmaya başlanan glukoz miktarının enzimsiz bir şekilde belirlenmesini sağlayacak hidrojel bazlı biyosensörlerin üretimi özellikle son zamanlarda geniş bir çalışma alanı doğurmuştur. Yapılan bu çalışmada da RGO'nun yüksek iletkenlik ve dayanıklılık özelliklerinden faydalanmak amacıyla, sodyum aljinat, hyalüronik asit ve jelatinin oluşturduğu polimerik ağ yapısına %0 dan % 50'ye kadar değişen miktarlarda RGO'nun eklenmesiyle iletken polimerik filmler (hidrojeller) elde edilmiştir. Yapıdaki RGO miktarının, şişme oranına etkisi incelendiğinde RGO miktarının artmasıyla suyun girebileceği serbest bölgelerin RGO tarafından işgal edilmesi diğer bir deyişle RGO'nun varolan boşlukları doldurması sebebiyle şişme oranının düştüğü tespit edilmiştir. En fazla iletkenlik değerine (4.25×10^{-5} S/cm) ise %30 RGO katkılı filmde ulaşılmıştır. Elde edilen RGO katkılı (SA:HA:Jel) iletken polimerik filmin (hidrojelin), elektrokimyasal sensör olarak döngüsel voltametrede performansı incelendiğinde glukozu karşı duyarlı olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre RGO katkılı (SA:HA:Jel) formülasyonunun ileride yapılacak daha detaylı çalışmalarla hidrojel bazlı ve enzimsiz bir sensör olarak kullanılabilmesi öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Canisius, A.D., Joselene S.J., Raja Ruban M.J., Varghese D., Muthupandi S., Madhavan J., Antony Raj M.V. (2023). Analysing the bifunctional ability of CuO/BiOBr/rGO as an electrode for non-enzymatic glucose sensor and supercapacitor, *Materials Letters*, 346, 134546.
- [2] Darvishi S., Souissi M., Kharaziha M., Karimzadeh F., Sahara R., Ahadian S. (2018). Gelatin methacryloyl hydrogel for glucose biosensing using Ni nanoparticles-reduced graphene oxide: An experimental and modeling study *Electrochimica Acta*, 261, 275-283.
- [3] Park, S., Boo, H., Chung, T.D. (2006). Electrochemical non-enzymatic glucose sensors, *Anal. Chim. Acta*, 556, 46-57.
- [4] Burrs, S., Vanegas, D., Bhargava, M., Mechulan, N., Hendershot, P., Yamaguchi, H., Gomes, C., McLamore, E. (2015). A comparative study of graphenehydrogel hybrid bionanocomposites for biosensing, *Analyst*, 140, 1466-1476.
- [5] Ahadian, S. Naito, U. Surya, V.J. Darvishi, S. Estili, M., Liang, X. Nakajima, K Shiku, H. Kawazoe, Y. Matsue, T. (2017). Fabrication of poly (ethylene glycol) hydrogels containing vertically and horizontally aligned graphene using dielectrophoresis: an experimental and modeling study, *Carbon*, 123, 460-470.

- [6] Krishnaiah, Y.S.R., Satyanarayana, V., Rama Prasad, Y.V., Narasimha Rao, S. (2002). In-vivo Evaluation of Sulphur Colloid as Tracers in Colonic Drug Delivery Systems Using Gamma Scintigraphy in Volunteers, *J. Pharm. Pharmaceut. Sci.*, 5, 24-28.
- [7] Hay, J., Rehman, Z.U., Mora, M.F., Wang, Y. (2013). Microbial Alginate Production, Modification and Its Applications, *Journal of Microbiology Biotechnology*, 6(6), 637-650.
- [8] Krishnaiah, Y.S.R., Satyanarayana, V., Kumar, B.D., Karthkeyan, R.S. (2002). Studies on The Development of Colon-Targeted Delivery Systems For Celecoxib In The Prevention of Colorectal Cancer, *J. Drug Targ.*, 10, 247-254.
- [9] Engin, B., Serdaroğlu, S., Kutlubay, Z., Tüzün, Y. (2010). Hyaluronik Asit Dolgular, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Tıp Fakültesi Dermatoloji Anabilim Dalı.
- [10] Yatmaz, E., Turhan, İ. (2015). Hyaluronik Asit ve Fermantasyonla Üretilmesi, *Antalya Gıda Dergisi*, 40 (4), 233-240.
- [11] Dursun, S., Erkan, N. (2009). Yenilenebilir Protein Filmler ve Su Ürünlerinde Kullanımı, *Journal of Fisheries Sciences*, 3(4), 352-373.
- [12] Mao, J.S., Zhao, L.G., Yin, Y.J., Yao, K.D. (2003) Structure and Properties of Bilayer Chitosan-Gelatin Scaffolds, *Biomaterials*, 24, 1067-74,
- [13] Bengi, U., Saygun, I., Periodontal Doku Mühendisliğinde Kullanılan İskele Yapıları, Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi, (2014), 67-73.
- [14] Premkumar, T., Geckeler, K. E. (2012). Graphene-DNA hybrid materials: assembly, applications, and prospects. *Progress in Polymer Science*, 37, 515-529.
- [15] Zhang, L. Jiang, Q. Zhao Y., Yuan Zha, ., X. Xie, H. (2022). Strong and tough PAm/SA hydrogel with highly strain sensitivity, *J. Renew. Mater.*, 10, 415.
- [16] Yadav, M., Ahmad, S. (2015). Montmorillonite/graphene oxide/chitosan composite: synthesis, characterization and properties, *Int J. Biol. Macromol.* 79, 923-933.
- [17] Kartick, B. Srivastava, S.K. Srivastava, I. (2013). Green synthesis of graphene, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 13 (6) 4320-4324.
- [18] Lin Y., Jin, J. Song, M. (2011). Preparation and characterisation of covalent polymer functionalized graphene oxide, *J. Mater. Chem.*, 21 (10), 3455-3461.
- [19] Rochman, R.A., Wahyuningsih, S., Ramelan, A.H., Hanif, Q.A. (2019). Preparation of nitrogen and sulphur co-doped reduced graphene oxide (rGO-NS) using N and S heteroatom of thiourea, *IOP Conf.Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 509, 012119.
- [20] Konios, D. Stylianakis, M.M. Stratakis, E. Kymakis, E. (2014). Dispersion behaviour of graphene oxide and reduced graphene oxide, *J. Colloid Interface Sci.*, 430, 108-112.
- [21] Zhu, Y. Stoller, M.D. Cai, W. Velamakanni, A. Piner, R.D. Chen, D. Ruoff, R.S. (2010) Exfoliation of graphite oxide in propylene carbonate and thermal reduction of the resulting graphene oxide platelets, *ACS Nano*, 4 (2), 1227-1233.
- [22] Fern´andez-Merino, M.J. Guardia, L. Paredes, J. Villar-Rodil S., Solís-Fernandez P., Martínez-Alonso, A. Tascon, J. (2010). Vitamin C is an ideal substitute for hydrazine in the reduction of graphene oxide suspensions, *J. Phys. Chem. C.*, 114 (14), 6426-6432.
- [23] Zhou, Z., Chen, J., Peng, C., Huang, T., Zhou, H., Ou, B., et al. (2014). Fabrication and physical properties of gelatin/sodium alginate/hyaluronic acid composite wound dressing hydrogel. *Journal of Macromolecular Science Part A: Pure and Applied Chemistry*, 51, 318-325.
- [24] Lian, M., Fan, J., Shi, Z., Zhang, S., Li, H., & Yin, J. (2015). Gelatin-assisted fabrication of graphene-based nacre with high strength, toughness, and electrical conductivity. *Carbon*, 89, 279-289.
- [25] Chen, G., Qiao, C., Xu, J. & Yao, J. (2014). Synthesis and characterization of reduced graphene oxide /gelatin composite films, *Polymer*, 38, 484-490.

A Comparison of Force Distribution Effects of Ductile and Brittle Adhesives at Different Hole Positioning

Sermet DEMİR¹ , Uğur KEMİKLİOĞLU² 

¹Doğuş Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

²Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Abstract

Composite joints are used in many industries such as aerospace, army, automotive, and marine because of their light, durable and corrosion-resistant properties. Composite joints can be made by applying different methods using elements such as adhesives, rivets, bolts, and nuts. Considering the lightness of a product, the most preferred connection type is adhesive joints. In most structures with adhesively bonded composite joints, weight is avoided to reduce energy consumption. In this study, fiber-reinforced thermoset plastics were manufactured as adherend, and two different adhesives were used; one has ductile, and the other has brittle properties. Holes were drilled on adhesively bonded single lap joints at different locations to investigate the mechanical effect of adhesives and adherend. The preferred specimen material was epoxy-infused e-glass fiber laminate manufactured using the vacuum infusion method. Tensile tests were performed on drilled, adhesively bonded joints. The force-elongation curves were generated and compared to each other depending on the positions of the drilled holes. The failure force of the samples with holes drilled in the middle of the bonded area was higher than those with holes drilled at the edge.

Keywords: Adhesives, Bonded joints, Hole effect, Weight reduction, Tensile test

I. INTRODUCTION

Composite materials exhibit outstanding features when compared to conventional materials. Although different composite manufacturing techniques can produce complex parts, there is an increasing need to join composite plates and sheets [1], [2]. Since their lightweight structures provide high energy efficiency, adhesively bonded joints are increasingly preferred in space, aeronautics, and vehicles. Besides, adhesive joints have some advantages, such as creating uniform stress distribution, high specific stiffness and strength, joining different materials, practical operation, corrosion and fatigue resistance, low cost, and suitability for bonding composite adherends with complex shapes and geometries [3], [4]. Adhesive bondings are preferred for joining similar and dissimilar materials as layers using different adhesives with the help of different joint configurations, such as single lap, double lap, beveled lap, and joggle lap bonded joints [5], [6]. Many studies on these techniques, like stress analysis, adhesion strength, fracture, and fatigue failure of adhesive joints with different adhesives, have also been studied in depth from mechanical aspects such as structural integrity, axial impact, and temperature effect [6]–[8]. Loading and environmental conditions, mechanical characteristics of adhesive and adherends, adhesive thickness, and the quality between adhesive and adherends were clarified as the main factors affecting primary damage mechanisms [8]–[10]. Therefore, it is essential to use the stress distribution of adhesively bonded joints fully.

In the literature, studies were reviewed on adhesively bonded joints that generally focused on the behavior of adhesive type, nanoparticle addition, and bonding methods to improve the performance of the joints [11]. Also, the effect of defects in the overlap was studied on the mechanical behavior of bonded joints using finite elements and experimental methods [12]–[15]. Durodola [16] investigated graded adhesive joints' analysis, method, fabrication, and experimental testing. It is concluded that the load was never distributed uniformly in the case of the strain, and stress distribution along the joint length was not uniform. Thus, the stress state was complex and advised to be clarified. He [17] has comprehensively researched finite element analysis (FEA) of adhesively bonded joints in static and fatigue loading, environmental effects, and dynamic characteristics. The FEA was a handy tool to determine the mechanical properties of adhesively bonded joints for any geometrical shape and load conditions. However, the adhesive layer meshing and the degrees of freedom number in the bonded joint were clarified as the main problems. In addition, the FEA benefits in the initial design and preliminary research are emphasized, but the necessity of experimental testing was also stated.

Functionally graded bonded joints offer even more opportunities for stress concentration reduction and stress distribution tailoring required for an adhesive layer. Li et al. [18] conducted an experimental study to observe the tensile performance of adhesively bonded composite joints. Design parameters such as adherend thickness, width, and overlap length were selected, and test results were compared. Jairaja et al. [19] showed that many different types of defects could affect the load-carrying capacity of an adhesively bonded joint. It has been stated that bond strength is dependent on the nature of defects and applied loads. Therefore, experimentally determining the stress distribution of different joint variations is crucial.

Stein et al. [20] have developed the Finite Fracture Mechanics model to understand the mechanical behavior of various joint configurations. They emphasized the importance of section forces and moments for predicting the failure load of different joint configurations. The failure behavior was described using stress and energy criteria, and they selected seven experimental test series to compare using three-dimensional parameters. The developed model was in good agreement with conservative results.

Zhang et al. [21] modelled a three-dimensional micromechanical finite element method to examine the mixed-mode response of a single Z-pinned composite laminate. Experimental studies validated the presented approach and claimed that the apparent fracture toughness of individual z-pins could be improved using their model. Another study [22] was about an experimental investigation of the usefulness of z-pins to maximize the structural properties of stiffened joints comprised of carbon/epoxy composite. Pull-off tests were carried out on T-joint with and without z-pins. They showed that z-pins did not improve the stiffness or failure initiation load of T-joints. In contrast, they effectively increased the ultimate failure strength, failure displacement, and adsorbed energy capacity.

Chang et al. [23] experimentally investigated the static tensile strength, fatigue life, and failure mechanisms of single lap joints made of carbon/epoxy composite as a function of the through-thickness reinforcement by fibrous pins. They suggested that the pinning increases the ultimate strength, elongation limit, and fatigue life. However, they studied pinned composite lap joints' monotonic and fatigue properties. They showed that ultimate failure, induced by pin pull-out, a shear fracture, or tensile laminate rupture, is based on the pins' volume content and diameter. The mechanical properties and stress state can be predicted by using analytical methods. Although the accuracy of current models is very high, a deep experimental investigation of the stress distribution of bonded surfaces is essential for different types of joints. However, all models were two-dimensional and limited to a case where the stress was higher in the loading condition [24]. Another study investigated the effect of different adhesives on aluminum adherends. It was explained that aluminum adherends are more durable than polymers [25].

In the study, two different ductile (Loctite 9466) and brittle (Loctite 9461) adhesives were used, and Glass Fiber fiber-reinforced polymer (GFRP) composites bonded with these two different adhesives as single lap joints. The joints were holed in different positions, and the mechanical properties of bonded joints were examined and compared by the hole effect in joints requiring weight reduction. The following sections of

this paper provide a detailed account of our study. In the next section, we describe the methods and materials used, including the manufacturing of samples. Subsequently, the main results of our analyses are presented. Finally, we engage in a discussion regarding the implications of our findings and provide concluding remarks to underscore the broader significance of our study.

II. MATERIALS AND METHOD

Glass fiber is commonly used in various industries for its excellent mechanical, thermal, and electrical properties. It is cheaper than other materials, such as carbon or kevlar and is significantly less brittle when used in composites. Because of these properties, GFRP was preferred for adhesive samples in this study.

Vacuum-assisted resin infusion method was used in the production of the plate. Eight plies of e-glass fiber fabric with a 300 g/m² density were prepared and positioned in the same direction to reach the required thickness. They were covered with peel-ply. All the process was carried out on a custom-made composite manufacturing table. The system was heated to 100 °C, and a vacuum was applied for 20 minutes before infusion. Thus, any possible leakage was checked, and the air was fully evacuated from the vacuum bag. Epoxy resin and hardener were used as the matrix material. The mixing ratio of resin and matrix material by weight was 1/3. Resin infusion was initiated and controlled occasionally until the epoxy reached all parts of the fabric.

The surface treatment of the glass fiber can improve the adhesion between the fiber and the paper or other materials. It can also provide other benefits, such as improved abrasion resistance or reduced static electricity. However, no finishing process was applied in this study. Glass fiber epoxy laminate has two surfaces, one rough and the other smooth, due to the peel-ply applied during the production phase. For the bonding process, the side of the plate with a rough surface is preferred for a stronger bond.

Samples were cut from the produced plate by the wet-cutting method. Sample dimensions are given in Figure 1a. Two different adhesive materials, Loctite 9461 & Loctite 9466, were used to bond the rough surfaces of these plates. Half of the plates adhered with Loctite 9461, whereas the other half adhered with Loctite 9466 adhesive materials. An equal amount of adhesive was used for each sample during adhesive application. Low weights are placed on the bonding area to prevent any slippage during curing, which will not affect the adhesion performance. Then, these specimens were cured for three days at room temperature. The dimensions of single lap joints and the curing procedures of these joints are shown in Figure 1.

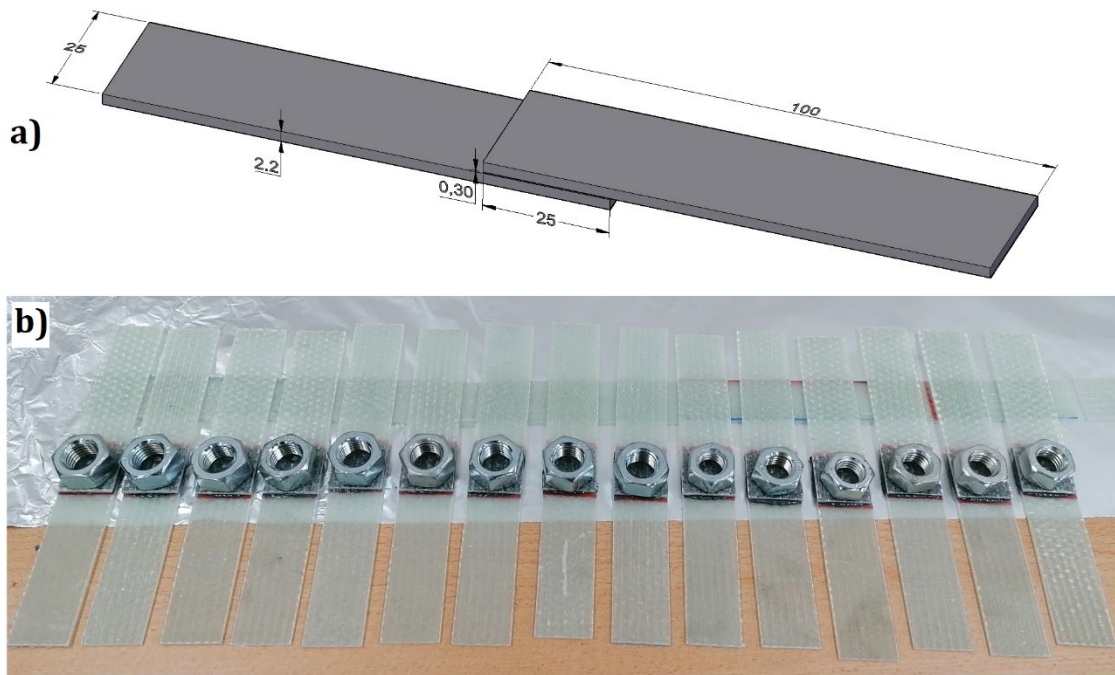


Figure 1. a) The dimensions of adhesively bonded single lap joints specimens, b) prepared samples

This study aims to investigate the force distributions in adhesive-bonded specimens with different hole forms drilled on the bonding surface. Therefore, different combinations and numbers of hole patterns were determined. The diameter of each hole is 4 mm. In the first design, there is a single hole in the center of the connection point. The second pattern contains three holes parallel to the traction direction of the material. The next design consists of 3 holes horizontally, inverse to the previous one. The fourth pattern combines the previous two designs in a T-shape. The last shape is formed by drilling holes in each corner of the connection point. The distance of the holes from the edges is 2 mm, and the distance between them is equal. Different abbreviations were used for the patterns. Their shapes and abbreviations are given in Figure 2.

The cutting speed and force applied during drilling can impact the quality of the hole in composite materials. Excessive heat can damage the material if the cutting speed is too low, while a too-high cutting speed may cause fraying or splintering. Insufficient force can result in poorly formed holes, while excessive force can cause delamination or cracking in the material. Using the appropriate cutting speed and drilling force for the specific composite material being drilled is important to achieve a clean, accurate hole. However, in this study, the use of CNC for drilling was not required as it was considered that the effect of hole forms or damage, such as delamination on adhesion, would be limited.

The cured specimens were drilled with a column drill bench fitted with a 4 mm diameter insert according to the patterns in Figure 2. The drilling process was applied at low and constant speed in three stages to prevent the formation of delamination. Three samples

were prepared for each experiment to reduce random error and environmental effects.

Table 1. Locations and abbreviated names of drilled samples

Hole Positioning	Name	Number of Holes	Abbreviation
	One Hole	1	OH
	Vertical Hole	3	VH
	Horizontal Hole	3	HH
	T Hole	5	TH
	Four Hole	4	FH

Hole positioning, drilling, and tensile test procedures are shown in Figure 2. Subsequently, tensile tests were applied to these specimens at a 1 mm/min rate via Testometric M500-30CT Universal Tester (The

Testometric Company Ltd., Rochdale, UK). After the experiments, all specimens broke from the bonding

area. Both cohesive and adhesive failure modes were observed. No substrate failure occurred in any test.

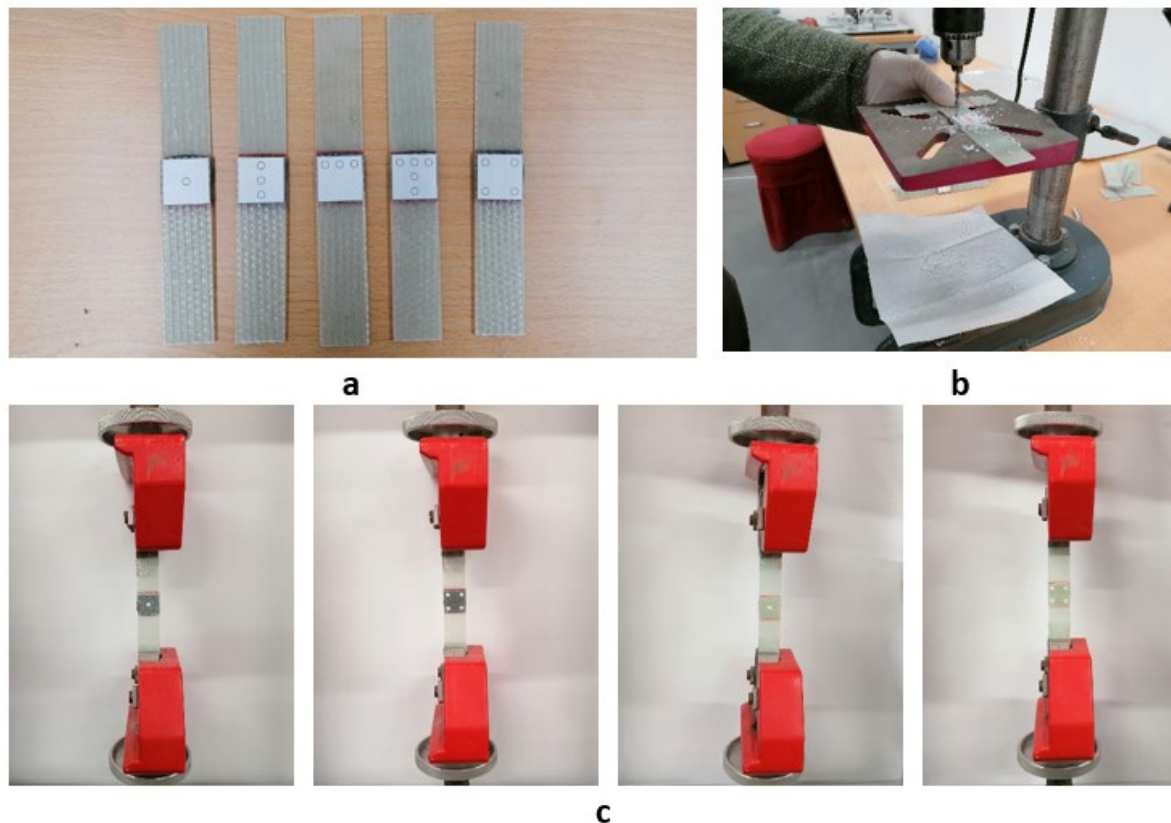


Figure 2. Specimen preparation and testing procedure: a) Hole positioning; b) Drilling; c) Tensile tests for the specimens of OH-9461, FH-9461, OH-9466 & FH-9466, respectively.

III. RESULTS AND DISCUSSION

The specimens were subjected to tensile tests, and force-extension diagrams were analyzed. Loctite 9461 epoxy adhesive is known to be more brittle than Loctite 9466. The results obtained were evaluated in light of this information. The mechanical properties of single lap joints with different hole orientations and patterns were compared. Load-displacement diagrams of single-hole (OH) joints for both adhesives are shown in Figure 3. As expected, the highest tensile strength for both adhesives was realized in the single-hole connection. Tensile strengths were measured as 6505 N and 10034 N for 9461 and 9466, respectively. Since Loctite 9466 has a more ductile structure, it elongated more (approximately 40%) and showed more strength.

In similar studies, single-screw or multiple-pin connections were preferred for hybrid connections [26]. In studies with a large number of pins, the focus was on the area ratio rather than the number of holes since the number of pins is very high. However, in our study, we tried to reveal the pattern effect by keeping the dimensions of all holes the same. Since the VH and HH joints have the same hole number, the force-elongation diagrams of those joints obtained for both adhesives are shown in Figure 4 together.

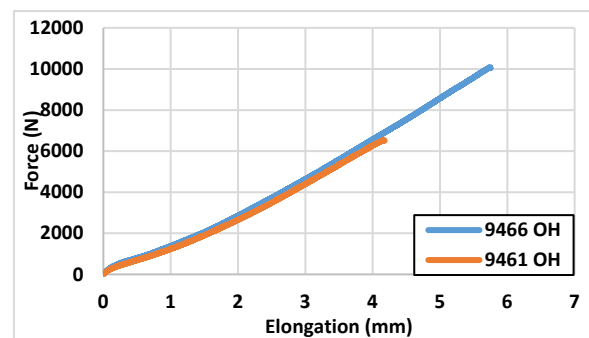


Figure 3. Force – Elongation diagram of One Hole (OH) joints

It is seen that the failure force of both joints decreases compared to OH joints. Damage occurs at 7790 N in the adhesively bonded junction created with Loctite 9466, whereas damage occurs at around 6050 N in the adhesively bonded joint formed with Loctite 9461. The decrease in the strength of 9466 was much higher than 9461. Here, it can be said that the decrease in the adhesion surface has a higher effect on ductile adhesives. Three holes drilled on the glued surface are in the edge region, showing that the damage forces are reduced compared to a single hole drilled at the middle point.

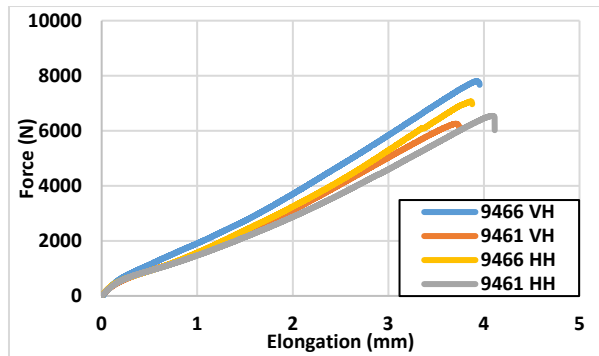


Figure 4. Force – Elongation diagram of (a) Vertical Hole (VH) and (b) Horizontal Hole (HH) joints.

The elongation of the joint with Loctite 9461 adhesive, which has a brittle feature, has increased compared to Loctite 9466. However, the failure force of Loctite 9466 is higher than Loctite 9461. The force-elongation diagrams of T-hole (TH) joints for both adhesives are shown in Figure 5.

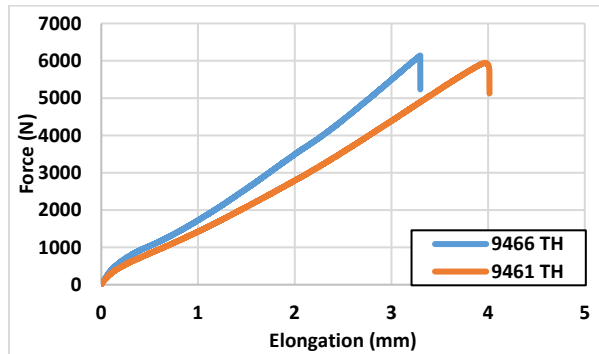


Figure 5. Force – Elongation diagram of T – Hole (TH) joints

The presence of horizontal and vertical holes in TH joints leads to a decrement in the failure load and elongation values of Loctite 9466 compared to Loctite 9461. It is seen that Loctite 9461 adhesive with brittle shows ductile features in T-hole adhesives. Similarly, Loctite 9466 adhesive, which has ductile properties, shows brittle properties. Both samples were damaged at around 6000 N in tensile tests for the TH pattern. The adhesion strength gradually decreases as the drilled holes approach the edge areas of the connection. A similar situation was also observed in VH- HH connections. The strength of HH joints positioned closer to the edge of the joint made with 9466 is lower than that of VH joints.

The force-elongation diagrams of FH joints for both adhesives are shown in Figure 6. It is seen that the lowest failure force of both connections occurs in such samples. In addition, the force and elongation values of the Loctite 9461 sample increased even more when compared to Loctite 9466.

The joint region takes the s-shape as the force increases in adhesive joints made with a ductile adhesive. Thus, the moment forces on the adhesion zone also increase. Since the distance from the rotation point is the highest at the ends, a weakness here causes the connection to break faster. It is thought that the advantage of ductile connection in TH and FH connection types is lost for this reason. Since holes were drilled at both ends in the FH connection, the damage occurrences were approximately the same for both adhesives.

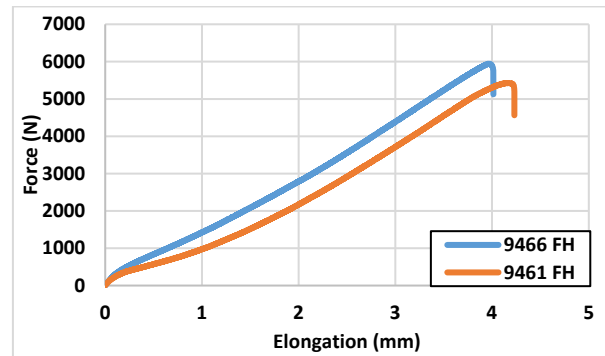


Figure 6. Force – Elongation diagram of Four Hole (FH) joints

In the study of CFRP and aluminum single-lap joints, strain profiles in the loading direction show the importance of location in hybrid joints [27]. The highest number of holes were drilled in TH and FH patterns. Although there were five holes in the TH pattern, the strength value was higher than FH for both adhesive types since their locations were closer to the center regions. The FH pattern has more parts in terms of bonding area. However, the holes are positioned near all edges, so the strength performance was lower. A similar situation was observed in VH and HH patterns. Although the bonding area was the same, VH showed a better performance.

When the hole parameters drilled in different locations on the bonding surface are examined together, it is seen that the failure forces vary for adhesives with different properties. Force-elongation diagrams created for different hole parameters of both adhesives separately are given in Figure 7. Increasing the number of holes in the ductile adhesive greatly affects the bond strength. This was observed less in 9461 with a brittle structure. Depending on the number and position of holes, the bond strength for both adhesives weakened.

In Figure 8, Dino-Lite (Naarden, Netherlands) optical microscope images of the damaged surfaces of the specimens after the tensile test are shown. For both adhesives, cohesive adhesive failure was intensively observed. Especially for HH and TH bonded adhesives, adhesive failure was observed around the holes close to the end region. It can be assumed that delamination occurred between the adhesive and the sample specimen during the drilling process. However,

adhesive damage appears less in other areas, indicating that there may be other effective factors. Another possibility is that the connection has been weakened in this area due to the drilling process.

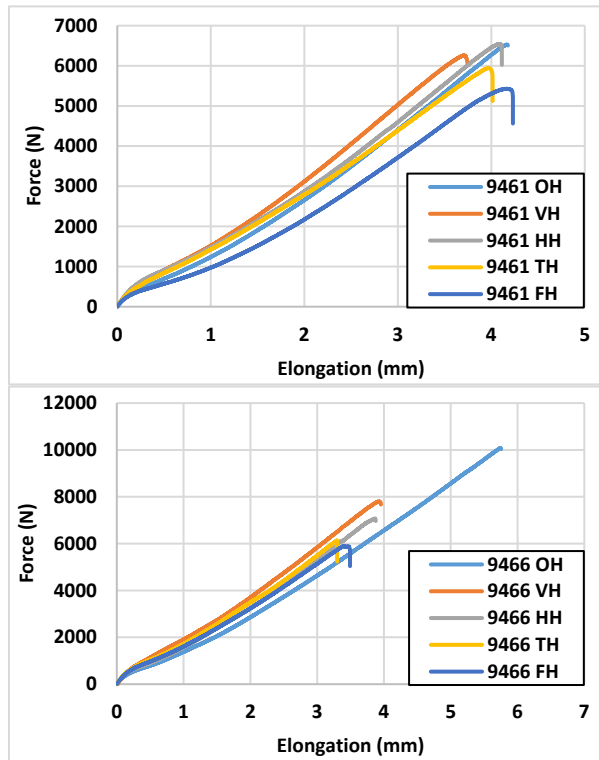


Figure 7. Force – Elongation diagrams of joints for different hole locations for Loctite a) 9461, b) 9466.

OH and VH joints show the least separation around the hole. Li et al. investigated the strength enhancement of bonded composite laminate joints reinforced with composite pins [28]. Numerical analysis and experimental results show that the least stress occurs around the central hole, while the highest values are observed at the edges. The separations in the edge regions of OH and VH with a central hole pattern show similar results. In a similar study, damage surface examinations showed that the separation started from the edges and the region far from the tensile direction [29]. The observation of the highest strength pattern in the specimens with a central single hole is consistent with the previous study.

The most preferred hole location for hybrid joints is in the center of the joint region. The placement of the pin significantly influences the mechanical behavior and performance of hybrid joints. Parkes emphasized the necessity of reinforcement in preventing rapid, unstable delamination by highlighting the beginning of bond-line damage in adhesive joints and its impact on joint stability [30]. This underscores the critical role of pin placement in enabling reinforcement and enhancing joint stability. Furthermore, Graham examined the

utilization of compliant adhesives in hybrid joints to enhance load sharing when combined with fasteners [31]. This highlights the need for a comprehensive evaluation of pin placement to optimize both load distribution and joint characteristics. The results obtained in this study show that hole location is an influential factor. Although more disadvantageous in terms of adhesion area, the better performance of different patterns is in line with the optimization research proposed in previous studies.

IV. CONCLUSION

This study used two different adhesives ductile (Loctite 9466) and brittle (Loctite 9461). The mechanical behavior of composite materials bonded with these two different adhesives in different hole orientations was investigated. The mechanical behavior of the hole effect on the adhesively bonded joints in the joints where the weight needs to be reduced was examined and compared. As a result of positioning the holes created on the bonding surface's center, it has been observed that the ductile or brittle properties of the adhesives do not change. Also, it was observed that there was no change in the ductility properties of the adhesives in vertical and horizontal holes. Although three holes were created on one side of the bonding surface in HH joints, the failure force was lower than those of the VH joints since there was no hole on the other side. Besides, the failure force in HH joints is higher than in VH joints, which shows that the excess holes formed at the edge of the bonding surface reduce the strength.

The ductility property of TH joints varied for both adhesives. Katsivalis performed quasi-static tensile tests on glass/steel joints using bolted, brittle (Araldite 2020) and ductile (Araldite 2047-1) adhesive joints [32]. It was shown that joints reinforced with ductile adhesive were stronger than joints with more brittle adhesives, although the strength was lower. This occurred because, inside the adhesively bonded area, a considerably bigger plastic zone for the ductile adhesive formed. During the formation of plastic deformation, the effect of the holes or the proportion of the bonding area can be influential. For this reason, adhesives with brittle properties can be preferred in TH joints that are desired to save material weight. The ductility property of FH joints also varied for both adhesives. This type of joint's strength is at the lowest level compared to other hole parameters. Therefore, it is not recommended to use FH joints. It is seen that the holes formed perpendicular to the tensile axis reduce the strength, especially in the HH and FH joints. It can be said that holes formed in the middle rather than the edge of the bonding surface do not reduce the strength much. For this reason, holes created in the edge areas should be avoided.

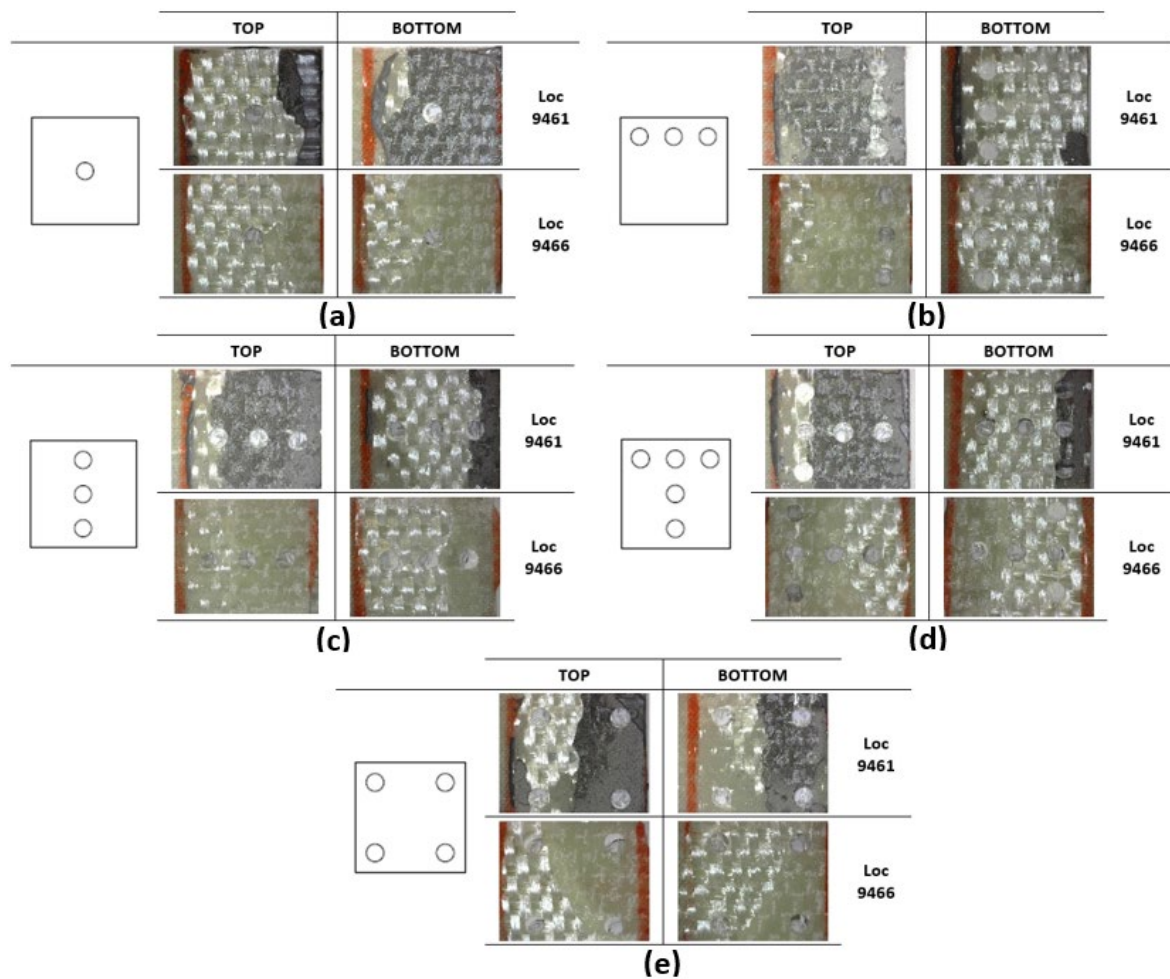


Figure 8. USB Microscope images after failure: a) OH, b) HH, c) VH, d) TH, e) FH. Bright areas are substrate surfaces.

ACKNOWLEDGMENT

This work has been supported by Dogus University Scientific Research Projects Coordination Unit under grant number 2021-22-D1-B02.

REFERENCES

- [1] El Zaroug, M, Kadioglu, F, Demiral, M, Saad, D., Experimental and numerical investigation into strength of bolted, bonded and hybrid single lap joints: Effects of adherend material type and thickness. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 87, 130–141 (2018).
- [2] Yılmaz, Y, Çallıoğlu, H, Balbay, A., Investigation of quasi-static crushing and energy absorption behaviors of carbon nanotube reinforced glass fiber/epoxy and carbon fiber/epoxy composite tubular structures. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 28, 1 81–90 (2022).
- [3] Khashaba, U, A, Najjar, I, M, R., Adhesive layer analysis for scarf bonded joint in CFRE composites modified with MWCNTs under tensile and fatigue loads. *Composite Structures*, 184, 411–427 (2018).
- [4] Günay, M, G., Torsion of variable stiffness composite laminated beams. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 28, 1, 18–25 (2022).
- [5] Shishesaz, M, Hosseini, M., A review on stress distribution, strength and failure of bolted composite joints. *Journal of Computational Applied Mechanics*, 49, 2 415–429 (2018).
- [6] Khosravani, M, R, Soltani, P, Weinberg, K, Reinicke, T., Structural integrity of adhesively bonded 3D-printed joints. *Polymer Testing*, 100 107262 (2021).
- [7] Arikan, V, Dogan, A, Dogan, T, Sabanci, E, Al-Shamary, A, K, J., Effects of Temperature and Hole Drilling on Adhesively Bonded Single-Lap Joints. *The Journal of Adhesion*, 91, 3 177–185 (2015).
- [8] Bouchikhi, A, S, Megueni, A, Gouasmi, S, Boukoulou, F, B., Effect of mixed adhesive joints and tapered plate on stresses in retrofitted beams bonded with a fiber-reinforced polymer plate. *Materials and Design*, 50 893–904 (2013).
- [9] Kemiklioğlu, U, Okutan, B, B. Vibration effects on tensile properties of adhesively bonded single lap joints in composite materials. *Polymer Composites*, 40, 3 1258–1267 (2019).
- [10] Demir, K, Gavgali, E, Fatih, A, Akpınar, S., The

- effects of nanostructure additive on fracture strength in adhesively bonded joints subjected to fully reversed four-point bending fatigue load. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 110 102943 (2021).
- [11] Avinc, I, Akpınar, S, Akbulut, H, Ozel, A., Experimental analysis on the single-lap joints bonded by a nanocomposite adhesives which obtained by adding nanostructures. *Composite Part B*, 110 420–428 (2017).
- [12] Heidarpour, F, Farahani, M, Ghabezi, P., Experimental investigation of the effects of adhesive defects on the single lap joint strength. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 80, 128–132, (2018).
- [13] Ribeiro, F, M, F, Campilho, R, D, S, G, Carbas, R, J, C, Silva, L, F, M., Strength and damage growth in composite bonded joints with defects. *Composites Part B*, 100 91–100 (2016).
- [14] De Moura, M, F, S, F, Daniaud, R, Magalhães, A, G., Simulation of mechanical behaviour of composite bonded joints containing strip defects. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26, 6 464–473 (2006).
- [15] Tamborrino, R, Palumbo, D, Galietti, U, Aversa, P, Chiozzi, S, Luprano, V, A, M., Assessment of the effect of defects on mechanical properties of adhesive bonded joints by using non destructive methods. *Composites Part B: Engineering*, 91 337–345 (2016).
- [16] Durodola, J, F., Functionally graded adhesive joints – A review and prospects. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 76, 83–89 (2017).
- [17] He, X., A review of finite element analysis of adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31, 4 248–264 (2011).
- [18] Li, J, Yan, Y, Zhang, T, Liang, Z., Experimental study of adhesively bonded CFRP joints subjected to tensile loads. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 57 95–104 (2015).
- [19] Jairaja, R, Naik, G, N., Numerical studies on weak bond effects in single and dual adhesive bonded single lap joint between CFRP and aluminium. *Materials Today: Proceedings*, 21 1064–1068 (2020).
- [20] Stein, N, Weißgraeber, P, Becker, W., A model for brittle failure in adhesive lap joints of arbitrary joint configuration. *Composite Structure*, 133 707–718 (2015).
- [21] Zhang, B, Allegri, G, Yasae, M, Hallett, S, R., Micro-Mechanical Finite Element Analysis of Z-pins under Mixed-Mode Loading. *Composites Part A*, (2015).
- [22] Koh, T, M, Feih, S, Mouritz, A, P., Experimental determination of the structural properties and strengthening mechanisms of z-pinned composite T-joints. *Composite Structures*, 93, 9 2222–2230 (2011).
- [23] Chang, P, Mouritz, A, P, Cox, B, N., Properties and failure mechanisms of pinned composite lap joints in monotonic and cyclic tension. *Composites Science and Technology*, 66 2163–2176 (2006).
- [24] Saleh, M, N, Saeedifar, M, Zarouchas, D, Freitas, S, T, De., Stress analysis of double-lap bi-material joints bonded with thick adhesive International Journal of Adhesion and Adhesives Stress analysis of double-lap bi-material joints bonded with thick adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 102480 (2019).
- [25] Darla, V, Satish, Ben, B, Sai, Srinadh, K, Venkata, Rao, K., Evaluation of aluminum to composite bonded lap joints” *High Performance Polymers*, 34, 10 1152–1163 (2022).
- [26] Bodjona, K, Lessard, L. Hybrid bonded-fastened joints and their application in composite structures: A general review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35, 9 764–781 (2016).
- [27] Chen, Y, Li, M, Yang, X, Luo, W., Damage and failure characteristics of CFRP/aluminum single lap joints designed for lightweight applications. *Thin-Walled Structures*, 153, 106802 (2020).
- [28] Li, W, Guo, S, Giannopoulos, I, K, He, S, Liu, Y., Strength enhancement of bonded composite laminate joints reinforced by composite Pins. *Composite Structures*, 236, 111916 (2020).
- [29] Xie, W, Luo, Z, Zhou, Y, Peng, W, Liu, Q., Experimental and numerical investigation on opposing plasma. *Chinese Journal of Aeronautics*, (2022).
- [30] Parkes, P, N, Butler, R, Meyer, J, de Oliveira, A., Static strength of metal-composite joints with penetrative reinforcement. *Composite Structures*, 118, 1 250–256 (2014).
- [31] Graham, D, P, Rezai, A, Baker, D, Smith, P, A, Watts, J, F., The development and scalability of a high strength, damage tolerant, hybrid joining scheme for composite-metal structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 64 11–24 (2014).
- [32] Katsivalis, I, Thomsen, O, T, Feih, S, Achintha, M., Strength evaluation and failure prediction of bolted and adhesive glass/steel joints. *Glass Structures and Engineering*, 3, 2 183–196 (2018).

Farklı Uzunluklarda Dinamik Kalça Vidası Yan Plakaları ile İntertrakanterik Kalça Kırığı Tedavisinin Biyomekanik Analizi

Biomechanical Analysis of Intertracranteric Hip Fracture Treatment with Dynamic Hip Screw Side Plates of Different Lengths

Oğuz KAYABAŞI¹ 

¹Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 81620 Konuralp Düzce

Öz

Dinamik kalça vidası (DKV), stabil tip intertrokanterik kalça kırıklarını tedavi etmek için kullanılan yaygın bir implanttır. Cerrahinin başarısını etkileyebilecek birçok faktör vardır. Yan plakaların uzunluğu faktörlerden biridir. Bu nedenle, DKV yan plakaların uzunluklarının biyomekanikini araştırmak önemlidir. İmplant başarısızlıklarını azaltmak ve farklı uzunluklarda yan plaka etkilerini anlamak için, bu çalışmanın amacı DKV'daki farklı uzunluklarda yan plakaları araştırmak için sonlu elemanlar analizini kullanmaya çalışmaktır. Bu sonlu elemanlar analizi çalışmasında intertrokanterik kalça kırıkları için, farklı uzunluklardaki DKV implantasyonunu simüle etmek için kortikal kemik, süngerimsi kemik, yan plaka, gecikme vidası için 3D model inşa edilmiştir. Yükleme koşulu, bir süje dik dururken femur başı üzerindeki kuvveti (400N) simüle etmek için kullanılmıştır. Bu çalışmada gecikme vidası, yan plaka, kortikal vidalar ve femurdaki gerilme dağılımını araştırılmıştır. En büyük gerilme, vidaların kortikal kemiklerle temas ettiği noktaların çevresinde meydana gelmiştir. Femurdaki en distal kortikal vidadaki gerilme en fazla olmuştur. Yan plakanın uzunluğu kısaltıldıkça kortikal vidalar üzerindeki gerilme artar ve bu da kortikal vidaları çevreleyen femur üzerindeki gerilmeyi artırır. Yan plakanın uzunluğu (2 delikli yan plaka) ve femur üzerindeki en uzak vida ile DHS kullanımı, yan plakanın dışarı çekilme riskini artırabilir. Bu çalışmanın sonuçları, ortopedik cerrahlar tarafından DKV implant uzunluklarının seçilmesi için biyomekanik bir analiz sağlayabilir.

Anahtar Kelimeler: Biyomekanik, Sonlu elemanlar analizi, Dinamik kalça vidası, İntertrakanterik kalça kırığı

Abstract

Dynamic hip screw (DKV) is a common implant used to treat stable type intertrochanteric hip fractures. There are many factors that may affect the success of surgery. The length of the side plates is one of the factors. Therefore, it is important to investigate the biomechanics of the lengths of the DKV side plates. To reduce implant failures and to understand the side-plate effects of different lengths, the aim of this study is to try to use finite element analysis to investigate side-lengths of different lengths in the DKV. In this finite element analysis study, a 3D model was constructed for intertrochanteric hip fractures, cortical bone, spongy bone, side plate, delay screw to simulate DKV implantation of different lengths. was used. In this study, the stress distribution in the delay screw, side plate, cortical screws and femur was investigated. The greatest stress occurred around the points where the screws contacted the cortical bones. The most distal cortical screw in the femur was most stressed. As the length of the side plate is shortened, the tension on the cortical screws increases, which increases the tension on the femur surrounding the cortical screws. The use of DHS with the length of the side plate (2-hole side plate) and the furthest screw on the femur can increase the risk of pulling out the side plate. The results of this study may provide a biomechanical analysis for the selection of DKV implant lengths by orthopedic surgeons.

Keywords: Biomechanics, Finite element analysis, Dynamic hip screw, Intertrochanteric hip fracture

Sorumlu Yazar: Oğuz KAYABAŞI, Tel: +903805421036, e-posta: oguzkayabasi@duzce.edu.tr

Gönderilme: 20.08.2019, **Düzenleme:** 26.09.2019, **Kabul:** 16.10.2019

I. GİRİŞ

Dinamik kalça vidası (DKV), stabil tip intertrokanterik kalça kırıkları için tercih edilen implanttır [1-3]. DKV kırılma bölgesinde kompresyon sağlar ve kullanımı nispeten kolaydır [4-8]. Lag vidası kesilmesi DKV ile karşılaşılan en yaygın komplikasyonlardan biridir. Uygun uç apeks mesafesi ve kırığın azaltılmasının gecikme vidası kesme riskini azalttığı düşünülmektedir [9-12]. Femur shaftından yan plaka çekilmesi DKV'nin bir komplikasyonudur [13], ancak bu konudaki tartışmalar yetersizdir. Daha uzun bir yan plaka kemikleri kavramak için daha fazla vida sağlayabilir, ancak bu daha uzun bir yara ve daha yumuşak doku tahribatına neden olur. Birçok çalışma farklı yan plaka uzunluklarının klinik gözlemlerle etkilerini araştırmış olmasına rağmen, [13-17], araştırmalar için biyomekaniği az sayıda çalışma kullanılmıştır [18-19]. Bu nedenle, ortopedi cerrahlarının, hastaları için uygun uzunluktaki yan plakaları seçmek için biyomekanik bir analize ihtiyacı vardır, bu da ameliyat sonrası komplikasyonları azaltabilir.

Önceki çalışmalarda, 4 delikli yan plakaların tedavi için ortak seçimler olduğu belirtilmiştir, ancak bazı araştırmacılar 2 delikli yan plakaların biyomekanik analiz ve klinik uygulamada yeterli stabilite sağladığını düşünmüşlerdir [13-19]. McLoughlin vd. implantasyon sonrası 2 ve 4 delikli yan plakanın biyomekanik durumunu araştırmak için kadavra deneysel bir çalışma yürütmüş, ve sonuçlar 2 delikli ve 4 delikli yan plaka arasındaki kararlılıkta önemli bir fark olmadığını göstermiştir [18]. 2 delikli DKV, döngüsel ve arıza yüklerinde 4 delikli DKV kadar biyomekanik olarak kararlıdır.

Bazı çalışmalar, 2 delikli yan plakaların kullanmanın yan plakanın dışarı çekilmesine neden olabileceğini bulmuştur. Laohapoonrungee vd. 2 delikli yan plaka ile DKV implantasyonu alan 83 hastayı gözden geçirmiş ve 2 hastanın yan plakadan çekildiğini görmüştür [13]. Riha vd. bir 2 delikli yan plaka ile DKV implantasyonu alan 32 hastanın, bir tanesi yan plaka çekisi yaşadığını bildirmiştir [14]. Bu çalışmalar, DKV'nin iki delikli bir yan plaka ile kullanılmasının tatmin edici sonuçlar verdiğini bulmuştur. Ancak vidaların çıkarıldığı veya kırılmanın dışındaki birkaç durum vardır. Yian vd. sabit yan plaka sabitlemesi için gereken optimal kortikal vida sayısını araştırmış ve üç kortikal vidanın optimal gerilim dağılımı sağlandığını tespit etmiştir [20]. Her ne kadar birçok çalışma yan plakanın uzunluğunu ve kortikal vida numaralarını incelemiş olsa da [13-21], az sayıda çalışma farklı yan plaka uzunlukları için komple bir biyomekanik analiz gerçekleştirmiştir [19].

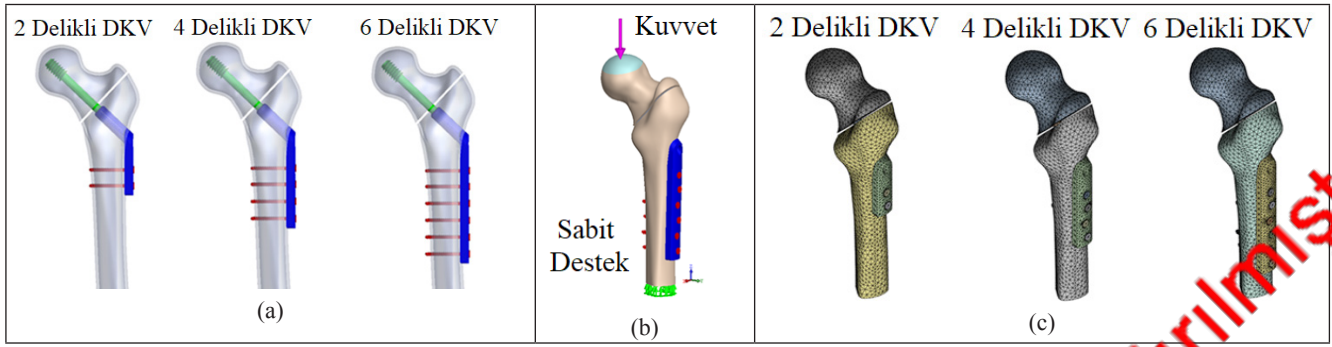
Sonru elemanlar analizinin (SEA) tıbbi araştırmalardaki uygulamaları çoğunlukla ortopedik veya dental biyomekanik

analizlerde [22-25]. SEA'nın avantajları, deneysel gözlemlerden elde edilemeyen genel yapının mekanik statüsünü sağlayan, gerilme dağılımı, yer değiştirme, zorlanma gözlemi için kullanılabiliridir. Bazı araştırmacılar, farklı uzunluktaki uç vidalarının ve farklı uzunluklardaki namluların etkilerini araştırmak için SEA'yı kullanmışlardır [26]. Roopakhun vd. SEA'in farklı uzunluklarda yan plaka uzunluklarına sahip DKV'nin mekanik performansını araştırmak için kullanılmış ve sonuçlar, implant gerilmesinde ve kırılma stabilitesinde artan plaka uzunluğunda anlamlı bir fark olmadığını göstermiştir [19]. Bununla birlikte, çalışmalarında gerilme dağılımının femur ve kortikal vidalar üzerindeki etkilerinin araştırılması yer almamıştır.

Yukarıda belirtilen çalışmalarda açıklamalara ve farklı yan plaka uzunluklarının hasta üzerindeki etkilerini anlamaya dayalı olarak, bu çalışmanın amacı, farklı uzunluklarda üç farklı yan plakaların biyomekanik bir analizini yapmak için SEA kullanmaya çalışılmıştır. Çalışmada (2 delikli, 4 delikli ve 6 delikli) DKV de kullanılmıştır. Çalışmada esas olarak gecikme vidası, yan plaka, kortikal vidalar ve femur üzerindeki stres dağılımı incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları ortopedi cerrahlarının ideal cerrahi sonuçlar elde etmeleri için biyomekanik bir analiz sağlayabilir ve gelecekteki tasarım ve implantların geliştirilmesi için biyomekanik bir temel sağlayabilir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma genel olarak DKV'deki farklı uzunluklarda yan plakaların üç boyutlu (3-D) SEA bilgisayar simülasyonunu; bu nedenle, klinik uygulamada sıkça karşılaşılan, farklı uzunluklarda (2 delik, 4 delik ve 6 delik) 3 grup DKV'nin SEA modeli kurulmuştur (Şekil 1 (a)). Bu çalışmada kullanılan modeller esas olarak kortikal kemik, süngerimsi kemik, yan plaka, gecikme vidası ve kortikal vidalar olmak üzere 5 bileşene ayrılmıştır. ABD'de Ulusal Sağlık Enstitüleri tarafından sağlanan bilgisayarlı tomografi görüntüleri (Görünür İnsan Projesi) kullanılarak bir femur modeli oluşturulmuştur (bu çalışmada kullanılan kemik modeli erkeğin sağ femurudur). Bu model esas olarak kortikal ve sünnetli kemikler olmak üzere 2 bileşene bölünmüştür ve büyük trokanterde 1 mm'lik bir kırılma alanı oluşturulmuştur. DKV ve kortikal vidalarla ilgili olarak, bu çalışmada çizim için 3B bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı (Pro/Engineer Wild-Fire 5.0) kullanılmıştır. Ayrıca, CAD yazılımı femur, DKV, vidalı vida ve kortikal vidaları montaj etmek için kullanılmıştır. (4,5 mm çapında, kullanılan vidalar dişlere sahiptir).



Şekil 1. (a) Bu çalışmada kullanılan 3 boyutlu bilgisayar modeli. (b) Yükleme koşulları ve sınır koşulları. (c) 3B bilgisayar modellerinin ağ yapısı

Gecikme vidası femur başının ortasına yerleştirilmiştir. İmplant için temel olarak gecikme vidasının ucundan femur kafasının tepesine 10 mm'lik bir mesafe kullanılmıştır. Ek olarak, uç-tepe mesafesi (TAD) değeri 22,5 mm (TADAP = 10 mm, TADLAT = 12,5 mm) (TAD = lateral radyografide ölçülen ön-arka radyograf (TADAP) + uç-tepe mesafesi üzerinde ölçülen uç-tepe mesafesi) TADLAT)). Bu çalışma DKV'ları boylarına göre 3 gruba ayırmıştır: 2 delikli DKV (birinci grup), 4 delikli DKV (ikinci grup) ve 6 delikli DKV grupları (üçüncü grup). Üç boyutlu bilgisayar modeli tamamlandıktan sonra, oluşturulan model analiz için FEA yazılımına (ANSYS Workbench 15.0, ANSYS, Inc., Canonsburg, PA) aktarılmıştır.

Bu çalışma temel olarak femur başı üzerindeki kuvveti, bir keğin dik durduğu bir senaryoda simüle etmiştir. Bu çalışma bir yük koşulu ve bir sınır koşulu sağlamıştır (Şekil 1 (b)). Yükleme koşulu, bir özne dik dururken femur başı üzerindeki kuvveti simüle etmek için kullanılır. Bu nedenle her iki bacadaki kuvveti taklit etmek için femur başı için 400 N (Z eksenine doğru) aşağı doğru bir kuvvet uygulanmıştır [25]. Ek olarak, bu çalışmada kullanılan sınır koşulları için femurun distal ucunda sabit bir destek sağlanmış, böylece X eksenine, Y eksenine ve Z eksenindeki yer değiştirme 0 olarak ayarlanmıştır. gecikme vidası ve yan plakasının namli su ayırma tipi olarak ayarlanmamış ve diğer parçalar arasındaki temas, bağlı bir tip olarak ayarlanmıştır. SEA yazılımı ANSYS Workbench'de "ayırma yük" seçeneği, temas belirlenirken bir miktar kaymaya izin verir. Öte yandan, "bağlı" seçeneği, iki yüzü (veya kenarı) birbirine bağlayarak boşluk bırakmaz [27].

Bu çalışmada kullanılan model femoral kortikal kemik, femoral süngerimsi kemik, gecikme vidası, yan plaka ve kortikal vidalar olmak üzere beş bölümden oluşmuştur. Bu çalışmada oluşturulan malzeme özellikleri önceki çalışmalardan elde edilmiştir [22-25]. Tüm malzemelerin homojen, izotropik ve doğrusal elastik olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle, malzeme özelliklerini ifade etmek için iki bağımsız

parametre (Young'ın modülü ve Poisson'ın oranı) kullanılmıştır. Tablo 1, bu simülasyonda kullanılan malzeme özelliklerini göstermektedir.

Tablo 1. Malzeme özellikleri [22-25]

Malzeme	Young modülü (MPa)	Poisson oranı
Cortikal kemik	17.000	0.3
Cancellous kemik	1.000	0.3
Yan plaka	200.000	0.3
Gecikme vidası	200.000	0.3
Kortikal vida	118.000	0.3

SEA analizinden sonra, bu çalışma çoğunlukla von Mises gerilmesinin dağılımını gözlem göstergesi olarak kullanılmıştır. Gözlenen von Mises gerilme bölgeleri, gecikmeli vida, yan plaka ve kortikal vidalardaki bölgelerdir. Femurun lateral ve medial tarafındaki stres dağılım durumu, farklı uzunluklarda yan plakalar kullanıldığında DKV'deki farklılıkları incelemek için belirlenmiştir.

SEA gerçekleştirilmeden önce, inşa edilen modelde bir yakınsama testi yapılmalıdır. Bu, bir simülasyon analizi yaparken SEA modeliyle daha doğru sonuçlar elde etmek içindir. Yakınsama testi modeli ile ilgili olarak, bu çalışmada temel olarak test yakınsama testinin sonucunu elde etmek için ağ büyüklüğü kontrolü kullanılmıştır. Ağın boyutları 5, 4, 3 ve 2 mm olarak seçilmiş ve karesel tetrahedral elemanlar çoğunlukla ağ için ANSYS Workbench yazılımında kullanılmıştır. Bu çalışma ağın ebatını vermiş olmasına rağmen, yazılım ağda otomatik olarak ağın işlevinde büyük bir eğriliği olan bir yerde, vida üzerindeki dişler gibi arındırır. Femur başı üzerine yük koşulu olarak 400 N (Z eksenine) aşağı doğru kuvvet uygulanmıştır. Femurun distal ucunda sınır durumu olarak sabit bir destek kullanılmıştır (Şekil 1 (b)). Yakınsama testi için farklı mesh boyutları kullanılmıştır. Bu çalışma, Tablo 2'de listelenen yakınsama değerleri için bir işaretleyici olarak kortikal kemiğin daha küçük trokanteri üzerinde

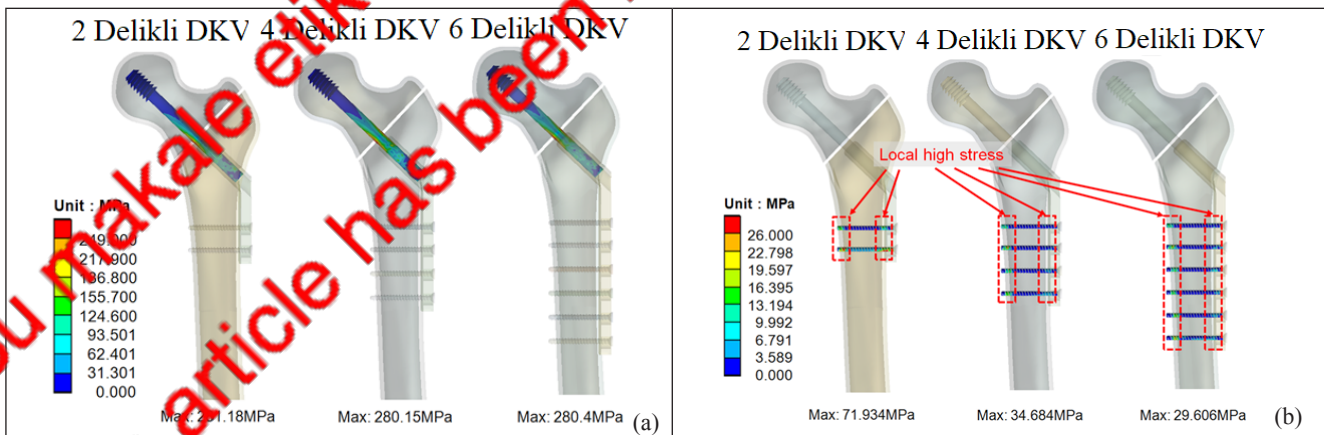
bulunan von Mises gerilmesinin maksimum değerini, Tablo 2’de sıralanan yakınsama değerleri için bir belirteç olarak gözlemlemiştir. Üç farklı modelde, % 2.450, % 0.974 ve % 0.368 yakınsaklıklarında farklılıklar saptanmıştır (yakınsama düzeyi, % 97.549, % 99.025 ve % 99.631). Daha önceki çalışmalardan bu yakınsama sonucunun bu çalışma için kabul edilebilir olduğunu ve yakınsama testi için % 5 yakınsamanın durma kriteri olduğu bulunmuştur [25,28]. Bu sonuçlar, bu çalışmada kullanılan modelin birbirine yaklaştığını göstermektedir. Bu nedenle, bu sonlu elemanlar ağ modellerinin farklı uzunluklardaki DKV’ları incelemek için kullanılması makul olacaktır. Yakınsama testinden sonra, çalışmada kullanılan üç FEA modelinin tümü, kuadratik tetrahedral elemanlar için ağ bölümlendirmesi için bir standart (Şekil 1 (c)) ve ANSYS Workbench FEA yazılımındaki mekanikler için bir analiz simülasyonu olarak 3 mm’lik bir ağ kullanılmıştır. Çalışmada 2 delikli modelde 93.965 düğüm noktası ve 53.089 eleman, 4 delikli modelde 117.724 düğüm noktası ve 67.054 eleman, 6 delikli modelde 141.475 düğüm noktası ve 80.971 eleman kullanılmıştır.

Tablo 2. Yakınsama test sonuçları.

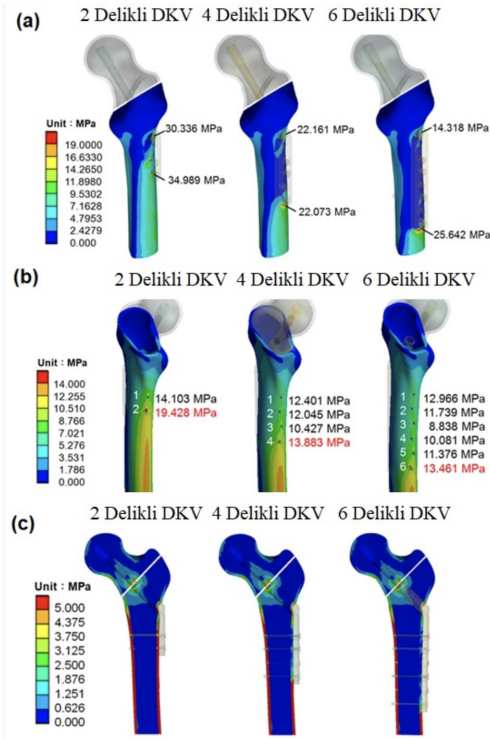
Ağ ölçüsü	2 Delikli model (MPa)	Yakınsama Seviyesi (%)	4 Delikli model (MPa)	Yakınsama Seviyesi (%)	6 Delikli model (MPa)	Yakınsama Seviyesi (%)
5mm	5.0928	95.467	4.5765	98.256	4.608	99.252
4mm	5.0944	95.973	4.6009	98.780	4.6252	99.560
3mm	5.2039	97.549	4.6123	99.025	4.6265	99.631
2mm	5.3346	-	4.6577	-	4.6436	-

III. SONUÇLAR

Bu sonlu elemanlar analiz çalışmasında, analiz edilen sonuçlar renk grafiği ile gösterilebilir. Şekil 2 (a) gecikme vidaları üzerindeki gerilme dağılımını göstermektedir. Üç grup arasında, her gecikme vidasındaki en büyük von Mises gerilme değerleri aşağıdaki gibidir. (2 delikli DKV, 281.18MPa; 4 delikli DKV, 280.15MPa; ve 6 delikli DKV, 280.4MPa). En büyük gerilme değerlerinin tümü kırık bölgesinde bulunmuştur. Üç gruptaki gecikme vidaları arasındaki en büyük gerilme değerleri arasındaki farklar dikkate değer değildir. Şekil 2 (b), kortikal vidalar üzerindeki gerilme dağılımını göstermektedir. Her gruptaki kortikal vidalar üzerindeki en büyük von Mises gerilme değerleri aşağıdaki gibidir: (2 delikli DKV, 71.934MPa; 4 delikli DKV, 34.684MPa; ve 6 delikli DKV, 29.606MPa). En büyük gerilme değerleri, vidaların kortikal kemikle temas ettiği noktaların etrafında meydana gelmiştir. 2 delikli DKV grubunda kortikal vidalar üzerindeki stres en büyüktür. Şekil 3 (a) implant yerleştirilmesinden sonra yanal olarak gözlendiğinde femurdaki stres dağılımını göstermektedir. Yanal plakanın uzunluğu daha uzun olduğunda, düşük stresli geniş bir alanın olacağını tespit edilmiştir. Şekil 3 (b), femur medial olarak gözlendiğinde gerilme dağılımını gösterir. Kortikal vidalar ile femurun medial korteksi arasındaki temas noktası çevresinde daha fazla gerilmenin üretildiğini göstermektedir. Sonuçlar en distal vidanın etrafındaki kemiğin daha fazla stres yaşayacağını göstermektedir. 2 delikli DHS grubunda bu stres değeri en büyüktür. Şekil 3 (a), femurdaki enine kesit gerilme dağılımını gösterir.



Şekil 2. (a) Gecikme vidalarındaki gerilme dağılımı. (b) Kortikal vidalarda gerilme dağılımı.



Şekil 3. (a) Femurun lateral tarafındaki gerilme dağılımı. (b) Femurun medial tarafında gerilme dağılımı. (c) Femurda kesitsel gerilme dağılımı.

IV. TARTIŞMA

DKV, stabil tip intertrokanterik kalça kırıklarının tedavi etmek için kullanılan yaygın bir implanttır. DKV'sının intertrokanterik kırıkların fiksasyonundaki başarısını belirleyen faktörler arasında kırık paterni, kırık azalmasının kalitesi ve gecikme vidasının konumu yer alır [4,5,9,10,11,29]. Gecikmeli vida kesimi ve yan plaka sökülmesi DKV yetmezliğinin ortak komplikasyonlarıdır. Genellikle daha uzun bir yan plakanın daha fazla stabilite sağlayabileceğine ve yan plakanın dışarı çekilmesi riskini en aza indireceğine inanılmaktadır. Bununla birlikte, daha uzun bir yan plaka daha uzun bir yara ve daha yumuşak doku hasarına neden olur. Bazı çalışmalar daha küçük bir insizyonla sahip 2 delikli bir yan plakanın implantasyonunun yeterli fiksasyon sağlayabileceğini belirtmiştir, ancak bu yan plaka çekmesi yine de gerçekleşebilir [13,14,15,16]. Bazı çalışmalar da kortikal vida kırılmasından dolayı başarısız olduğunu bildirmiştir [13]. Bu çalışma, implantatın sonrası farklı uzunluklarda DHS yan plakalarının biyomekanik etkilerini araştırmak için FEA'yı başarıyla kullanılmıştır. Bu çalışma aynı zamanda, yan plakanın uzunluğunun, femur kemiğinin kortikal kemiği üzerindeki stresin daha fazla artmasına neden olabileceğini

göstermiştir. Bu çalışmanın sonuçları ortopedi cerrahları tarafından yan plaka uzunluklarının seçimi için mekanik bir temel sağlayabilir.

Bu çalışmanın sonuçları, her gruptaki gecikme vidası üzerindeki stres değerlerinde önemli bir farklılık göstermemiştir (Şekil 2 (a)). Bunun ana nedeni, bu çalışmada kullanılan gecikme vidasının ve namlunun uzunluklarının sabit olması olabilir. Daha önceki çalışmalar, daha uzun bir gecikme vidası kullanıldığında, gecikme vidası üzerindeki gerilmenin daha kısa bir gecikme vidası kullanıldığında olduğundan daha büyük olduğunu belirtmiştir [25]. Daha kısa namlulu bir yan levhanın kullanılması, gecikme vidası ve namlu üzerinde daha fazla strese neden olacaktır. Bu çalışmada aynı uzunlukta gecikme vidaları ve varilleri kullanılmıştır; bu nedenle, her gruptaki gecikme vidası ve namlu üzerindeki gerilme farklılıklarına dikkate değer değildi. Ek olarak, bu çalışma kortikal vidalardaki gerilme dağılımını da incelemiştir. En büyük gerilme vidaların kortikal kemiklerle temas ettiği noktaların çevresinde meydana gelmiştir (Şekil 2 (b)). Bunun sebebi, kortikal vidaların kortikal kemik ve süngerimsi kemik içinden geçtiği zaman, Young'ın kortikal kemiğin modülü daha büyük olduğu için (kortikal kemik üzerindeki stres süngerimsi kemikte olduğundan daha büyüktü), kortikal vida kortikal kemik ile bağlandı; bu nedenle, kortikal vida her iki tarafta da kortikal kemikle temas ettiği yerde daha fazla stres sağlamıştır. Her ne kadar bu çalışmanın kortikal vidaları üzerindeki tepe gerilimi, nihai dayanımdan (paslanmaz çeliğin nihai mukavemeti yaklaşık 850 MPa) [30] daha düşük olmasına rağmen, kortikal vida kırılması yorulma arızası ile indüklenebilir [31]. Bazı DKV yetersizliği vakalarında, kortikal vidaların kırılma yeri bu çalışmanın sonuçlarıyla uyumlu olmuştur [13]. Ek olarak, yan levhanın uzunluğu ne kadar uzun olursa kortikal vidalar o kadar çok kullanılır ve kortikal vidalar üzerindeki baskı o kadar düşük olur.

Asıl sebep, kortikal vidalar ne kadar çok kullanılırsa, kortikal vidalar ile femur arasındaki temas yüzey alanı o kadar büyük olur ki bu da kortikal vidalar üzerindeki baskıyı azaltabilir. Femur üzerindeki gerilme değerlerine bakıldığında bu çalışma, yan plaka temas tarafında implantın desteğinden dolayı femur stresinin göreceli olarak daha düşük olduğunu göstermiştir. Bu, gerilme koruma etkisiyle açıklanabilir. Gerilme koruyucu etki, implante edilen malzeme ile kemik arasındaki elastik modülde fark büyük olduğunda ortaya çıkar. Başlangıçta kemik tarafından sağlanan gerilme, implant tarafından korunur ve böylece kemikteki gerilmeyi azaltır. Ek olarak, femurun medial tarafının gözlemleri, kortikal vidaları çevreleyen kemiğin, özellikle kemik üzerindeki stresin en büyük olduğu en distal kortikal vida olan daha fazla gerilmeye maruz kaldığını ortaya koymuştur ve

2 delikli DKV grubundaki gerilme diğer 2 gruptakilerden daha büyüktü (4 delikli ve 6 delikli DKV grubu; Tablo 3). Önceki literatürler, normal kemikte, nihai mukavemet değerinin yaklaşık 105 ila 120Mpa [30, 32] olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, yaş ve hastalık aynı zamanda kortikal kemiğin nihai kuvvet değerini de etkiler. Bu nedenle, vida çekme işlemi daha büyük gerilme değerleriyle ortaya çıkabilir. Bu nedenle, 2 delikli DHS'nin hastalarda kullanılması, yan plakanın dışarı çekilme riskini artırabilir ve vidanın çıkarılmasını önlemek için daha uzun bir yan plaka seçilebilir. Ek olarak, klinik olarak, kortikal vidadaki iplik, stres konsantrasyonundan dolayı kortikal kemikte daha yüksek gerilmeye neden olabilir.

Bu çalışmada bu SEA'de bazı sınırlamalar vardır. Materyal özelliklerinin, bu çalışmada simülasyonu basitleştirmek için homojen, izotropik ve doğrusal elastik olduğu varsayılmıştır ve başkalarının çalışmalarına atıfta bulunarak ayarlanmıştır [22,25,28]. Bu varsayımın sonuçları gerçek durumlardan farklı olsa da, çalışma eğilimleri değişmeyecektir. Ek olarak, femur modelinde, bu çalışma sadece femurun proksimal kısmını kullanılmıştır. Bunun ana nedeni femurun proksimal kısmının bu çalışmada gözlemlenen konum olmasıydı ve bu sadeleştirme bilgisayar simülasyon süresini kısaltabilir. Ek olarak, kortikal vidalar vida dişlerine sahip olduğundan, kemik implantı (vida dişleri) arayüzünde üretilen yüksek gerilme, gerilme konsantrasyonunun geometrik görünümünün neden olduğu yüksek gerilme nedeniyle olabilir. Bu nedenle, çalışma kemik-implant arayüzünü gözlemlerse; sonuç elemanlar analizi kullanılarak hatalı araştırma sonuçlarına yol açabilir (stresin yoğunlaştığı yeri bulmak için doğru elemanlar analizinin kullanılması genellikle doğru değildir). Daha önceki biyomekanik çalışmalar proksimal femur 23'e kas kuvveti eklemiş olmasına rağmen, proksimal femur ve kalça ekleminde abduktörler, addüktörler, fleksörler, ekstensörler dış rotatörler ve iç rotatörler dahil olmak üzere birçok kas grubu vardır. Her bir kas grubu farklı kasları içerdiğinden, her kasın kuvvet ve kuvvet yönü hareket sırasına farklı olacaktır. Bu nedenle, kas faktörlerinin mekanik analizi daha karmaşık hale getirmesine izin vermemek için, bu çalışma yalnızca femur başından femura iletimin aşağı doğru dış kuvveti bir yükleme koşulu olarak kullanılmıştır. Böyle bir dış kuvvet yaklaşımı, farklı dış kuvvetlerin çalışmanın sonuçları üzerindeki etkisinde kullanılabilir. Her ne kadar bu çalışmada bazı basitleştirmeler yapılmış ve gerçek durumlarla farklı olan koşullar kullanılmış olsa da, araştırılan konu için net bir eğilim göstermiştir.

Bu çalışmada FEA gözlemlerine dayanarak, farklı uzunluklarda DHS yan plakalarının biyomekanik durumu araştırılmıştır. Bu analizden elde edilen sonuçların gerçek durumlarla bazı farklılıkları olsa da, veriler farklı uzunluklarda yan

plakaları seçerken ortopedi cerrahları için referans sağlamıştır. Bu aynı zamanda implant başarısızlıklarını azaltarak hastaların daha iyi prognoz kazanmalarını sağlayabilir.

V. SONUÇ

Bu çalışmada genel olarak DKV'daki farklı uzunluklardaki yan plakaların etkilerini araştırılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, farklı yan plakalar implante edildiğinde çekilme vidası ve namlu üzerindeki baskıda önemli bir fark olmadığını göstermiştir. Bu çalışma aynı zamanda yan plakanın (2 delikli) uzunluğu ne kadar kısa olursa kortikal vidalar üzerindeki gerilmenin o kadar yüksek olduğunu göstermiştir. Bu, kortikal vidaları çevreleyen kemik üzerindeki stresi artıracaktır. 2 delikli yan plaka ile DKV kullanımı, yan plaka çekme riskini artırabilir. Bu çalışmanın sonuçları, ortopedik cerrahlar tarafından DKV implant uzunluklarının seçilmesi için biyomekanik bir analiz sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Kaplan K, Miyamoto R, Lemme BR, Egol KA, Zuckerman JD. (2008). Surgical Management of Hip Fractures: An Evidence-based Review of the Literature. II: Intertrochanteric Fractures, *J Am Acad Orthop Surg* 16(11):665-673.
- [2] Ahn, J, Bernstein J. (2010). Fractures in brief: intertrochanteric hip fractures, *Clin Orthop Relat Res* 468(5):1450-1452.
- [3] Lorich DG, Geller DS, Nielson, JH, (2004). Osteoporotic pertrochanteric hip fractures: management and current controversies, *J Bone Joint Surg Am* 86(2):398-410.
- [4] Mairands CC, Newman RJ, (1989). Implant failures in patients with proximal fractures of the femur treated with a sliding screw device, *Injur*,20(2):98-100.
- [5] Davis TR, Sher JL, Horsman A, Simpson M, Porter BB, Checketts RG, (1990). Intertrochanteric femoral fractures. Mechanical failure after internal fixation, *J Bone Joint Surg Br* 72(1):26-31.
- [6] Spivak JM, Zuckerman JD, Kummer FJ, Frankel VH, (1991). Fatigue failure of the sliding screw in hip fracture fixation: a report of three cases, *J Orthop Trauma* 5(3):325-331.
- [7] Arastu MH, Phillips L, Duffy P, (2013). An unusual failure of a sliding hip screw in the immediate post-operative period, *Inj Extra* 44(2):23-297.
- [8] Amis AA, Bromage JD, Larvin M, Fatigue fracture of a femoral sliding compression screw-plate device after bone union, *Biomaterials* 8(2):153-157, 1987.
- [9] Haidukewych GJ, (2009). Intertrochanteric fractures: ten tips to improve results, *J Bone Joint Surg Am* 91(3):712-719.
- [10] Rubio-Avila J, Madden K, Simunovic N, Bhandari M, Tip to apex distance in femoral intertrochanteric fractures: A systematic review, *J Orthop Sci* 18(4):592-598, 2013.

- [11] Andruszkow H, Frink M, Frömke C, Matityahu A, Zeckey C, Mommsen P, Suntardjo S, Krettek C, Hildebrand F, (2012). Tip apex distance, hip screw placement, and neck shaft angle as potential risk factors for cut-out failure of hip screws after surgical treatment of intertrochanteric fractures, *Int Orthops* 36(11):2347–2354.
- [12] Sommers MB, Roth C, Hall H, Kam BC, Ehmke LW, Krieg JC, Madey SM, Bottlang M, (2004). A laboratory model to evaluate cutout resistance of implants for pertrochanteric fracture fixation, *J Orthop Trauma* 18(6):361-368.
- [13] Laohapoonrungee A, Arpornchayanon O, Pornputkul C, (2005). Two-hole side-plate DHS in the treatment of intertrochanteric fracture: Results and complications, *Injury* 36(11):1355–1360.
- [14] Riha D, Bartonicek J, (2010). Internal fixation of pertrochanteric fractures using DHS with a two-hole side-plate, *Int Orthop* 34(6):877–882.
- [15] Bolhofner BR, Russo PR, Carmen B, (1999). Results of intertrochanteric femur fractures treated with a 135-degree sliding screw with a two-hole side plate, *J Orthop Trauma* 13(1):5-8.
- [16] DiPaola M, Rozbruch SR, Helfet DL, (2004). Minimal incision technique using a two-hole plate for fixation of stable intertrochanteric hip fractures, *Orthopedics* 27(3):270–274.
- [17] Baird RP, O'brien P, Cruickshank D, (2014). Comparison of stable and unstable pertrochanteric femur fractures managed with 2-and 4-hole side plates, *Can J Surg* 57(5):327-330.
- [18] McLoughlin SW, Wheeler DL, Rider J, Bolhofner B, (2008). Biomechanical evaluation of the dynamic hip screw with two – and four-hole side plates, *J Orthop Trauma* 14(5):318-323.
- [19] Roopakhun S, Siamuna K, (2012). Finite element analysis of dynamic hip screw for intertrochanteric fracture, *Int J Model Opt* 2(2):158-161.
- [20] Yian EH, Banerji I, Matthews LS, (1997). Optimal side plate fixation for unstable intertrochanteric hip fractures, *J Orthop Trauma* 11(4):254-259.
- [21] Rog D, Grigsby P, Hill Z, Finette W, Inceoglu S, Zuckerman L, (2017). A biomechanical comparison of the two – and four-hole side-plate dynamic hip screw in an osteoporotic composite femur model, *Orthop Surg* 25(2):1-6.
- [22] Chen DW, Lin CL, Hu CC, Wu JW, Lee MS, (2012). Finite element analysis of different repair methods of Vancouver B1 periprosthetic fractures after total hip arthroplasty, *Injury* 43(7):1061–1065.
- [23] Seral B, García JM, Cegoñino J, Doblaré M, Seral F, (2004). Finite element study of intramedullary osteosynthesis in the treatment of trochanteric fractures of the hip: Gamma and PFN, *Injury* 35(2):130-135.
- [24] Taheri NS, Blicblau AS, Singh M, (2011). Comparative study of two materials for dynamic hip screw during fall and gait loading: titanium alloy and stainless steel, *J Orthop Sci* 16(6):805–813.
- [25] Tzeng CY, Huang KC, Wu YC, Chang CL, Lee KR, Su KC, Biomechanical effect of different lag screw lengths with different barrel lengths in dynamic hip screw system: a finite element study, *J Mech Med Biol* 17(1):1750008, 2017.
- [26] Hofmann-Fliri L, Nicolino TI, Barlaet J, Gueorguiev B, Richards RG, Blauth M, (2017). Biomechanical evaluation of a new locking sliding hip screw for intertrochanteric femur fractures, *J Orthop Res* 35(1):1-10.
- [27] Windolf M, Cement augmentation of implants—no general cure in osteoporotic fracture treatment. (2016). A biomechanical study on non-displaced femoral neck fractures, *J Orthop Res*, 34(2):314-319.
- [28] ANSYS User's Manual (2014).
- [29] Ke MJ, Huang KC, Lee CH, Chu HY, Wu YT, Chang ST, Chiang SL, Su KC, (2017). Influence of three different curvatures flex-foot prosthesis while single-leg standing or running: a finite element analysis study, *J Mech Med Biol* 17(3):1750055
- [30] Goffin JM, Pankaj P, Simpson AH, (2013). The importance of lag screw position for the stabilization of trochanteric fractures with a sliding hip screw: a subject-specific finite element study, *J Orthop Res* 2013;31:596-600
- [31] Enderle JD, Bronzino JD, (2012). Introduction to Biomedical Engineering. Burlington, MA: Academic Press;
- [32] Zand MS, Goldstein SA, Matthews LS, (1983). Fatigue failure of cortical bone screws, *J Biomech* 16(5):305-311,
- [33] Bartel DL, Davy DT, Keaveny TM, (2006). Orthopaedic biomechanics: mechanics and design in musculoskeletal systems, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River,