

Cilt 4 Sayı 1 Haziran 2023  
Volume 4 Number 1 June 2023

ISSN: 2717-8811(Online)

**JOURNAL**

**Materials  
and  
Mechatronics:A**

2023  
JMM  
A

# **JOURNAL**

**Materials**

**and**

**Mechatronics: A**

**e-ISSN: 2717-8811**

**Cilt: 4 Sayı: 1 Haziran 2023**

**Volume:4 Number:1 June 2023**

**2023**

# JOURNAL of MATERIALS and MECHATRONICS:A

<b>Editör Kurulu / Editorial Board</b>		
Yusuf KAYALI (Editor-in-Chief)	ykayali@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Ersan MERTGENÇ (Associate Editor)	ersanmertgenc@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY
<b>Malzeme Mühendisliği / Materials Engineering</b>		
Ali GÜNEN (Section Editor)	ali.gunen@iste.edu.tr	İskenderun Technical University, TURKEY
Şükrü TALAŞ (Section Editor)	stalas@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Gökhan GÖRHAN (Section Editor)	ggorhan@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Ali ERÇETİN (Section Editor)	aercetin@bandirma.edu.tr	Bandırma Onyedi Eylül University, TURKEY
<b>Mekatronik Mühendisliği / Mechatronics Engineering</b>		
İsmail YABANOVA (Section Editor)	iyabanova@aku.edu.tr	Celal Bayar University, TURKEY
<b>Elektrik ve Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering</b>		
Said Mahmut ÇINAR (Section Editor)	smcinar@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY
<b>Enerji Sistemleri Mühendisliği / Energy Systems Engineering</b>		
Ali KECEBAŞ (Section Editor)	alikecebas@mu.edu.tr	Muğla Sıtkı Koçman University, TURKEY
<b>Bilgisayar ve Yazılım Mühendisliği / Computer and Software Engineering</b>		
Gür Emre GÜRAKSIN (Section Editor)	emreguraksin@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY
<b>Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering</b>		
Mehmet Erdi KORKMAZ (Section Editor)	merdikorkmaz@karabuk.edu.tr	Karabük University, TURKEY
İsmail Doğan KÜLCÜ (Section Editor)	ismaildogan.kulcu@ikc.edu.tr	İzmir Katip Celebi University, TURKEY
<b>Otomotiv Mühendisliği / Automotive Engineering</b>		
Fatih AKSOY (Section Editor)	faksoy@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY
<b>Biyomedikal Mühendisliği / Biomedical Engineering</b>		
Mehmet Lütfi YOLA (Section Editor)	mlutfi.yola@hku.edu.tr	Hasan Kalyoncu University, TURKEY
Yiğit Ali ÜNCÜ (Section Editor)	yuncu@akdeniz.edu.tr	Akdeniz University, TURKEY
<b>Kimya-Kimya Mühendisliği / Chemical-Chemical Engineering</b>		
Aysel BUYUKSAĞIŞ (Section Editor)	absagis@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY
<b>Fizik-Fizik Mühendisliği / Physics-Physics Engineering</b>		
Mehmet ÖZKAN (Section Editor)	mozkan@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY

# JOURNAL of MATERIALS and MECHATRONICS:A

Şükrü TALAŞ (Language Editor)	stalas@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Aytekin HİTİT (Language Editor)	hitit@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY

## Danışma Kurulu / Advisory Board

Dr. Adem KURT	Gazi University, TURKEY
Dr. Adnan MAQBOOL	Institute of Space Technology, PAKISTAN
Dr. Ali Sabea HAMMOOD	University of Kufa, IRAQ
Dr. Anas Al ATTIEH	German University of Jordan, JORDAN
Dr. Anne Schuzl BEENKEN	South Westphalia University of Applied Sciences, GERMANY
Dr. Aytaç Uğur YERDEN	Gedik University, TURKEY
Dr. Dursun ÖZYÜREK	Karabük University, TURKEY
Dr. Erdoğan KANCA	İskenderun Technical University, TURKEY
Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Dr. Hazizan Md AKİL	Sains Malaysia University, MALAYSIA
Dr. Kubilay ASLANTAŞ	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Dr. Michał KULKA	Poznan University of Technology, POLAND
Dr. M. Serhat BAŞPINAR	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Dr. Metin ÖZGÜL	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Dr. Mourad KEDDAM	University of Science and Technology Houari Boumediene, ALGERIA
Dr. Oğuz ARSLAN	Bilecik Seyh Edebali University, TURKEY
Dr. Ramazan KAÇAR	Karabük University, TURKEY
Dr. Selçuk AKTÜRK	Muğla University, TURKEY
Dr. Süleyman GÜNDÜZ	Karabük University, TURKEY
Dr. Shabana SHEIK	University of Pune, Department of Physics, INDIA
Dr. Sumanjit SINGH	Senior Audi Engineer, GERMANY
Dr. Yılmaz YALÇIN	Afyon Kocatepe University, TURKEY

## Yayımcı / Publisher

Yusuf KAYALI	ykayali@aku.edu.tr
--------------	--------------------

## Mizanpaj Editörü / Layout Editor

Mahmud Cemaletdin YALÇIN	mcyalcin@aku.edu.tr
Hicri YAVUZ	hicriyavuz@aku.edu.tr

## Temel İletişim / Primer Contact

Journal of Materials and Mechatronics: A	editorjournalmm@gmail.com
--	---------------------------

## Sekreter / Secretary

Yavuz Bahadır KOCA	ybkoca@aku.edu.tr, sekreterjournalmm@gmail.com
--------------------	--

# JOURNAL of MATERIALS and MECHATRONICS:A

İçindekiler/Contents	Sayfa/Page
<b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b>  Elle Kaldırma Hareketinde Kutu Boyutunun L5/L1 Eklemine Etkisinin İncelenmesi  Investigation of the Effect of Box Weight on L5/S1 Joint in Manual Lifting  Canlıdınç, M., Güleşen, M.	1-10
<b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b>  Comparison of Welded Joint Stress with Experimental and Finite Element Method Using of Hotspot Method  Hotspot Yöntemi Kullanılarak Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kaynaklı Bağlantı Gerilmelerinin Karşılaştırılması  Özden, O.B., Gökçe, B., Erdemir, A.	11-22
<b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b>  The Effects of Use of Cu-W Sinters in MIG-MAG Welding Contact Tips for Improved Continuous Wire Abrasion Performance  MIG-MAG Kaynak Kontak Kılavuzlarında Cu-W Kompozit Sinterlerin Sürekli Tel Aşındırma Performansı için Kullanımı  Yazar, M., Talaş, Ş.	23-37
<b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b>  The Investigation of Production Parameters and Their Effect on the Tribomechanical Properties of the Compression Molded Polymeric Bearing Materials  Basınçlı Kalıplanmış Polimer Yatak Malzemelerinde Üretim Parametrelerinin Tribomekanik Özellikler Üzerinde Etkisinin İncelenmesi  Kaya, E.	38-49

# JOURNAL of MATERIALS and MECHATRONICS:A

İçindekiler/Contents	Sayfa/Page
<p><b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b></p> <p>Pomza Taşının Otomotiv Sürtünme Malzemesi Olarak Kullanımının Araştırılması</p> <p>Investigation of the Use of Pumice Stone as Automotive Friction Material</p> <p>Çengelci, E., Bayrakçeken, H.</p>	50-63
<p><b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b></p> <p>Investigation of Numerical Methods SPH, ALE, Coupled MM-ALE with LBE and CONWEP Empirical method for Simulation of the Spherical Free Air Blast Loading with Using LS Dyna</p> <p>LS Dyna ile Serbest Hava Ortamındaki Patlama Yükünün Sayısal Simülasyonu için SPH, ALE, Birleştirilmiş ALE-LBE ve CONWEP Yöntemlerinin İncelenmesi</p> <p>Savrukoğlu, İ., Aslantaş, K.</p>	64-86
<p><b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b></p> <p>Bazalt Elyaf Yüzeyindeki Silan Katmanının Polilaktit Kompozitlerine Güçlendirme Etkinliğinin Değerlendirilmesi</p> <p>Evaluating Reinforcement Effectiveness of Silane Layer on Basalt Fiber Surface to Its Composites with Polylactide</p> <p>Tayfun, Ü., Arslan, Ç., Doğan, M.</p>	87-99
<p><b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b></p> <p>YSZ Seramik Üst Kaplamaya Sahip Termal Bariyer Kaplamaların (TBCs) Katı Partikül Erozyon (SPE) Davranışlarının İncelenmesi</p> <p>Investigation of Solid Particle Erosion (SPE) Behaviors of Thermal Barrier Coatings (TBCs) with YSZ Ceramic Top Coating</p> <p>Özkan, D., Erdoğan, G., Özgürlük, Y., Binal, G., Yılmaz, S.E., Karaoğlanlı, A.C.</p>	100-115

# JOURNAL of MATERIALS and MECHATRONICS:A

İçindekiler/Contents	Sayfa/Page
<b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b> Optimization of Generalized Certainty Equivalents on the Finite Horizon Sonlu Ufukta Genelleştirilmiş Kesinlik Eşdeğerlerinin Optimizasyonu Basu, A.	116-133
<b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b> Examination of Deformation in Thin-Walled Structures Processed by Micro-Milling Method Mikro-Frezeleme Yöntemi ile İşlenen İnce Duvarlı Yapılarda Deformasyonun İncelenmesi Hasçelik, A., Aslantaş, K.	134-146
<b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b> Balance Control of a Flywheel Inverted Pendulum by Fuzzy Logic Controller Bulanık Mantık Denetleyicisi ile Volan Ters Sarkacın Denge Kontrolü Erkol, H.O., Közkurt, C.	147-160
<b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b> Alan Isıtma Uygulamalarında Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Doğalgaz Sistemine Alternatif Olarak Değerlendirilebilmesi için Optimum Teşvik Miktarlarının Belirlenmesi Determining The Optimum Amount of Incentive for Using a Ground Source Heat Pump as an Alternative to The Natural Gas System in Space Heating Applications Kapıcıoğlu, A.	161-176

# JOURNAL of MATERIALS and MECHATRONICS:A

İçindekiler/Contents	Sayfa/Page
<p><b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b></p> <p>Isıl İşlemin Bakır Kaplı Çelik Boruların Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması</p> <p>Investigation of the Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Copper Clad Steel Pipes</p> <p>Koyuncu, O., Çelik, B., Akgül, Y., İncesu, A.</p>	177-192
<p><b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b></p> <p>Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Altı Eksenli Robot Kol ile Görüntü İşleme ve Yapay Zeka Tabanlı Ürünlerin Tasniflemesi</p> <p>Production of Six-Axis Robot Arms with Additive Manufacturing and Classification of Image Processing and Artificial Intelligence Based Products</p> <p>Kaya, Z., Aksoy, B., Özsoy, K.</p>	193-210
<p><b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b></p> <p>Eş Merkezli İç İç Borulu Isı Değiştiricisinde Go-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Su Hibrit Nano Akışkanının Deneysel Analizi</p> <p>Experimental Analysis of Go-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Water Nano Fluid in A Concentric Tube Heat Exchanger</p> <p>Gürbüz, Y.E.</p>	211-223
<p><b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b></p> <p>Thermomechanical Response of Functionally Graded Ti-6Al-4V and Zirconia Biomaterial Plates</p> <p>Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Ti-6Al-4V ve Zirkonya Biyomalzeme Plakalarının Termomekanik Tepkisi</p> <p>Özmen, R.</p>	224-243



# JOURNAL of MATERIALS and MECHATRONICS:A

İçindekiler/Contents	Sayfa/Page
<b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b>  Parametric Optimization of Cutting Force and Temperature in Finite Element Milling of AISI P20 Steel  AISI P20 Çeliğinin Sonlu Eleman Frezelemesinde Kesme ve Sıcaklığın Parametrik Optimizasyonu  Binali, R.	244-256
<b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b>  İlaç-İlaç Etkileşimlerini Keşfetmek: Bir Ağ Analizi ve Görselleştirme Yaklaşımı  Exploring Drug-Drug Interactions: A Network Analysis and Visualization Approach  Uysal, İ., Köse, U.	257-270
<b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b>  Çok Fonksiyonlu Akıllı Masa Saati  Multifunctional Smart Table Clock  Yumurtacı, M.	271-285
<b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b>  Evaluation of Hot Corrosion Behavior of WC-Co-Cr Coatings Coated by the HVOF Method  HVOF Yöntemiyle Kaplanan WC-Co-Cr Kaplamaların Sıcak Korozyon Davranışlarının Değerlendirilmesi  Özgürlük, Y.	286-301

# JOURNAL of MATERIALS and MECHATRONICS:A

İçindekiler/Contents	Sayfa/Page
<p><b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b></p> <p>Effect of Boron-Aluminide Coating Applied on R4 Grade Offshore Mooring Chain Steel on Pitting and Tribo-Corrosion Behaviour</p> <p>R4 Kalite Açık Deniz Demirleme Zinciri Çeliğine Uygulanan Bor-Alüminid Kaplamannın Çukurlaşma ve Tribo-Korozyon Davranışına Etkisi</p> <p>Alkan, S.</p>	302-317
<p><b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b></p> <p>Dimension Optimization of Polycentric Knee Mechanism Using the Bees Algorithm and Genetic Algorithm</p> <p>Dört Çubuk Mekanizmalı Diz Protezlerinin Arı Algoritması ve Genetik Algoritma ile Boyut Optimizasyonu</p> <p>Ayğahoğlu, M.E., Gümüş, M.S., Çakan, A., Kalyoncu, M.</p>	318-332
<p><b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b></p> <p>AA6061 Serisi Alüminyum Plakalarına Yapılan MIG ve TIG Kaynak Tamirlerinin Tahribatlı ve Tahribatsız Testlerle İncelenmesi</p> <p>Investigation of MIG and TIG Welding Repairs on AA6061 Series Aluminum Plates by Destructive and Non-Destructive Tests</p> <p>Arslan, M., Toplan, N.</p>	333-354

**Araştırma Makalesi / Research Article**

**Elle Kaldırma Hareketinde Kutu Boyutunun L5/S1 Eklemine Etkisinin İncelenmesi**

Melih CANLIDİNÇ<sup>1\*</sup>, Mustafa GÜLEŞEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye,  
Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-4011-9490>, melih.canlidinc@dpu.edu.tr

<sup>2</sup> Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye,  
Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0001-8781-2746>, mustafa.gulesen@dpu.edu.tr

**Geliş/ Received:** 04.10.2022;

**Kabul / Accepted:** 14.12.2022

**ÖZET:** Günlük hayatta ve çalışma koşullarında elle nesne kaldırma eylemi yaygın olarak uygulanmaktadır. Elle nesne kaldırma eylemi insan vücut eklemlerinde çeşitli yüklenmeler oluşturmaktadır. Araştırmalara göre özellikle bel bölgesi kaldırma hareketinden en çok etkilenen bölgedir ve kaldırma hareketi sırasında bel bölgesindeki omurlar incelendiğinde, moment kolunun en yüksek olduğu L5/S1 eklemdeki yüklenme en yüksektir. Elle nesne kaldırma hareketinde L5/S1 eklemine etkisinin incelendiği araştırmalarda, kaldırma hareketi nesnenin iki yanındaki nesne tabanından belirli yükseklikteki tutamaçlardan tutularak gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada katılımcılar elle kaldırma hareketini önceki çalışmalardan farklı olarak kutuların altından kavrayarak gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde katılımcıların 16 kg kütleli ve 3 farklı ebattaki kutuların 2 farklı kaldırma tekniği olan çömelerek ve eğilerek kaldırma hareketi sırasında L5/S1 eklemine oluşan yüklerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Kaldırma hareketleri Microsoft Kinect v2 kamerayla kaydedilmiştir. Kutuların elle kaldırma hareketinin L5/S1 eklemine etkisini incelemek amacıyla OpenSim biyomekanik model yazılımı kullanılmıştır. Kullanılan biyomekanik modele aktarılan insan vücut eklemleri konum verilerinin ters kinematik analiziyle eklem açıları, ters dinamik analiziyle ise eklem torqları elde edilmiştir. Daha sonra eklem reaksiyon analizi yapılarak L5/S1 eklemine binen yükler değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda küçük, orta ve büyük kutularda çömelerek kaldırma hareketinde L5/S1 eklemine etkiyen kompresyon kuvvetleri eğilerek kaldırmaya göre %8.8-9.1-9.6 oranında artış, eğilerek kaldırma hareketinde L5/S1 eklemine etkiyen kesme kuvvetleri çömelerek kaldırmaya göre %24.5-25.7-27.4 oranında artış göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kaldırma teknikleri, Kinectv2, Kas-iskelet sistemi, OpenSim.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: [melih.canlidinc@dpu.edu.tr](mailto:melih.canlidinc@dpu.edu.tr)

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Canlıdınç, M., Güleşen, M. (2023). Elle Kaldırma Hareketinde Kutu Boyutunun L5/S1 Eklemine Etkisinin İncelenmesi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 1-10.

## Investigation of the Effect of Box Weight on L5/S1 Joint in Manual Lifting

**ABSTRACT:** Manual lifting is widely practiced in daily life and working conditions. The act of lifting objects by hand creates various loads on the human body joints. According to researches, especially the lumbar region is the region most affected by the lifting movement, and when the vertebrae in the lumbar region are examined during the lifting movement, the load on the L5/S1 joint, where the moment arm is the highest, is the highest. In studies examining the effect of manual object lifting on the L5/S1 joint, the lifting movement is carried out by holding the handles at a certain height from the object base on both sides of the object. In this study, the participants performed the manual lifting movement by grasping the bottom of the boxes, unlike previous studies. In the experiments, the loads formed on the L5/S1 joint were evaluated during the lifting movement of the participants by crouching and bending, which are 2 different lifting techniques of boxes of 16 kg mass and 3 different sizes. Lifting movements were recorded with the Microsoft Kinect v2 camera. OpenSim biomechanical model software was used to examine the effect of manual lifting of the boxes on the L5/S1 joint. Joint angles were obtained by inverse kinematic analysis of the position data of human body joints transferred to the used biomechanical model, and joint torques were obtained by inverse dynamic analysis. Afterwards, joint reaction analysis was performed and loads on the L5/S1 joint were evaluated. As a result of the experiments, the compression forces acting on the L5/S1 joint increased by 8.8-9.1-9.6% in the squat lifting movement in small, medium and large boxes compared to the stoop lift, and the shear forces acting on the L5/S1 joint in the stoop lifting movement increased by 24.5-25.7-27.4% compared to the squat lifting.

**Keywords:** Lifting techniques, Kinectv2, Musculoskeletal system, OpenSim.

### 1. GİRİŞ

Endüstriyel işlerde teknolojik gelişmelere ve otomasyonun yaygınlaşmasına rağmen birçok sektörde çeşitli işler çoğunlukla elle yapılmaktadır. Elle kaldırma hareketi yapılırken sık ve tekrarlayan manuel ağırlık kaldırma aktiviteleri ve uygun olmayan vücut duruşları kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına yol açabilir. Kaldırma ve indirmeden kaynaklanan aşırı efordan kaynaklanan bel ağrısı, elle malzeme taşıma çalışanları için önemli bir yaralanma ve hastalık kaynağıdır.

Bel rahatsızlıkları, malzeme taşıma işleriyle ilgili kas-iskelet sistemi hastalıklarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Dünyadaki meslek hastalıklarının yaklaşık %40'ı ve ABD'de %38'i bel hastalıklarından kaynaklanmaktadır. Bu bozukluklar işe devam edememenin önemli nedenleridir (Bureau of Labor Statistics, 2019).

Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği Enstitüsü (NIOSH), kutu kaldırma sırasında oluşabilecek bel yaralanmalarının tahmini için kaldırma denklemini oluşturmuştur. Ancak, kaldırma denklemi, statik koşullarla uğraşırken dinamik kaldırma hareketinin etkilerini incelemek için uygun bir araç değildir. (Bruno ve ark., 2015). Kaldırma hareketi dinamik olarak gerçekleştiğinden, kaldırmanın gövde eklemleri üzerindeki yüklerinin -tork ve kuvvetlerin- analizi statik hesapların yanı sıra dinamik hesaplar ile yapılmalıdır.

Ergonomik olarak uygun olmayan duruşlar, özellikle ağır nesnelere kaldırırken, manuel malzeme taşıyıcıları sırt yaralanmaları geliştirme riskini artırır (Rajae ve ark., 2015; Jia ve ark., 2011). Çoğu çalışma, L5/S1 disk sıkıştırma kuvvetinin, kaldırma görevleri sırasındaki bel gerilmelerinin ana indükleyicisi olarak rolüne dair ampirik kanıtlar sağlar (Faber ve ark., 2020). En büyük moment kolu L5/S1 diskinde etki ettiğinden kaldırma sırasında diğer disklere göre daha fazla gerilmeye maruz kalır. Bu nedenle, çömelerek kaldırma (dizler bükülü ve sırt dümdüz) endüstriyel

çalışanlara ve sporculara (özellikle haltercilere) ağırlık kaldırmak için doğru duruş olarak önerilir, çünkü çömelerek kaldırma sırasında L5/S1 diskine daha az moment yerleştirilir ve yüklenmeler belden bacaklara aktarılır (McGill ve ark., 2013).

Kaldırma hareketini inceleyen çalışmalarda, eğilme ve çömelme kaldırma tekniği olarak tanımlanmıştır (Koopman ve ark., 2018; Matthew ve ark., 2019; Vilas-Boas ve ark., 2019). Genel olarak, ağır nesnelere kaldırmak için çömelerek kaldırma önerilir, çünkü bu tekniğin, kaldırma üzerine eğilmeye kıyasla daha düşük disk sıkıştırması ve kesme kuvvetleri ile sonuçlandığına inanılır. Öte yandan, eğilerek kaldırma, çömelerek kaldırmaya kıyasla daha yüksek disk sıkıştırmasına ve kesme kuvvetlerine neden olduğu için hafif nesnelere kaldırmakla sınırlandırılmalıdır (Roozbahani ve ark., 2021). Eğilerek kaldırma sırasında gözlenen yüksek disk sıkıştırması, L5/S1 eklemi etrafındaki yüksek eğilme momentinden kaynaklanmaktadır (Gholipour ve ark., 2016).

Kaldırma aktiviteleri sırasında lomber omurga, spinal yüklenmeyi tahmin etmek için birçok biyomekanik model geliştirilmiştir. Koopman ve ark. 2018, alt sırt yüklemesini mekanik olarak incelenmiştir. Faber ve ark. L5/S1 momentlerini tahmin etmek için bir biyomekanik model tasarlanmıştır (Faber ve ark., 2020). Bu modeller tasarlanırken L5/S1 eklemi ve diğer vücut parçalarının konum bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için hareket yakalama sistemleri kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı, vücutta belirli noktalara cilt üzerine yerleştirilen işaretleyicilerle yapılan hareket yakalama sistemidir. İşaretçilerden ve sensörlerden elde edilen konum bilgileri, vücut eklemlerinin konumunu tahmin etmek için kullanılır. Ancak bu sistemin uygulanmasında çeşitli zorluklar vardır. Öncelikle sistemin kurulum maliyeti yüksektir ve özel hareket takip laboratuvarlarına ihtiyaç vardır. Sahada yapılması planlanan çalışmalarda ölçüm yapmayı zorlaştırmaktadır (Gholipour ve ark., 2016).

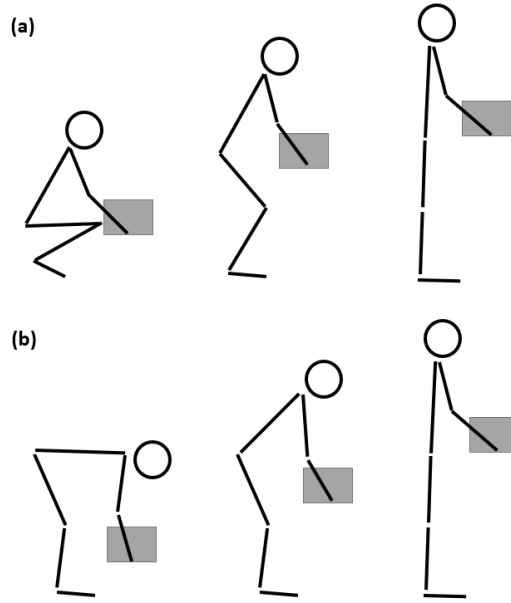
Sonraki çalışmalarda araştırmacılar, işaretçiler ve sensörler kullanarak hareket izleme sistemine alternatif yöntemler araştırmıştır. Bu çalışmaların bazılarında işaretersiz hareket yakalama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, işaretçilerle hareket yakalamaya kıyasla düşük maliyeti ve kullanım kolaylığı nedeniyle Kinect v2 kamera kullanımı tercih edilmiştir. Kinect v2, insan vücudu iskelet tanımlama fonksiyonuna sahip olması, taşınabilirlik ve kullanım kolaylığı gibi avantajlara sahiptir. Bu çalışmalara örnek olarak Vilas-Boas ve ark. 2019, yürüyüş analizi için bir Kinect kamerası kullanmıştır, Roozbahani ve ark. insan hareketlerinin gerçek zamanlı simülasyonlarını kullanmıştır (Roozbahani ve ark. 2021).

Elle nesne kaldırma hareketinin vücut uzuvlarına etkisini araştırmalara baktığımızda kaldırma hareketi, kaldırılan nesnenin (kutu, kasa vb.) her iki tarafında bulunan ve belirli yükseklikteki tutamaçlardan tutularak yapılmıştır. Fakat günlük hayatımızda bu tarz yükler, tutamaç olmadan zeminden (nesnenin altından) kavranarak kaldırılmaktadır. Daha gerçekçi bir sonuç elde edilmesi açısından, bu çalışmada kutuların altından tutularak elle kaldırma hareketinin L5/S1 eklemine etkisi incelenmiştir. Eğilerek ve çömelerek kaldırma görevleri sırasında L5/S1 eklemine etkiyen yüklerin tahmini için Kinect iskelet modelinden elde edilen ölçümlerin, bir biyomekanik modele aktarılarak ve dinamik analiz sonuçları önceki çalışmaların sonuçlarıyla değerlendirilmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma sağlıklı üç erkek katılımcı (erkek; yaş: 28±4, boy: 178±5 cm, ağırlık: 78±6 kg) tarafından yapılmıştır. Katılımcılar çalışmaya başlamadan önce bilgilendirilmiş ve çalışma boyunca ilgili hareket teknikleri denetlenmiştir.

Katılımcılar iki standart kaldırma tekniği olan eğilerek ve çömelerek kaldırma tekniklerini uygulamıştır. Katılımcılara iki kaldırma tekniği sözlü olarak anlatılmış ve gerçek ölçümlerden önce denemeler yapılmıştır. Eğilerek kaldırma hareketi sırasında, katılımcılara yerdeki kutuyu altından iki elle tutarak dik konuma kaldırmak için dizlerini tamamen uzatmaları ve gövdelerini eğmeleri talimatı verilmiştir (Şekil 1a); çömelerek kaldırma hareketinde ise dizler tam fleksiyonda, topuklar kaldırılarak ve gövde dik duruma yakın olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1b) (McGill ve ark., 2013).



Şekil 1. Elle kaldırma teknikleri a) Çömelerek kaldırma, b) Eğilerek kaldırma

Katılımcılardan 16 kg kütleli 3 farklı ebattaki kutuyla kaldırma hareketlerini yapması istenmiştir. Kaldırılan kutuların boyutları küçük (38x28x18 cm), orta (45x32x25 cm) ve büyük (40x40x35cm) olarak belirlenmiştir. Her bir kaldırma hareketinde kutu, sagittal düzlemin ortasına yerleştirilmiştir. Katılımcı kutuyu 0 cm yükseklikten (yerden) iki eliyle simetrik olarak kaldırdı ve bel hizasında ayakta tutmuştur.

Katılımcıya çömelerek ve öne eğilme kaldırma tekniğini (kaldırma sırasında dizler ve gövde hafifçe bükülü) benimsemesi talimatı verilmiştir. Pelvisin lateral pozisyonu fleksiyon ve burulma torklarını değiştirebileceğinden, katılımcının kaldırma boyunca ayaklarını kaydırmasına izin verilmemiştir (Plamondon ve ark., 1995). Ayrıca, L5/S1 ekleminin yüklemeye üzerindeki zaman etkisini en aza indirmek için katılımcıdan kaldırmayı yaklaşık iki saniyede (ilk kaldırmadan ayakta duran kutuyu bel hizasında tutana kadar) tamamlaması istenmiştir. Her kaldırma koşulu için beş tekrar (toplam 15 kaldırma) yapılmıştır. Altı kaldırma koşulu rastgele atanmış ve katılımcıya her kaldırma koşulu arasında oturma pozisyonunda dinlenmesi için beş dakika verilmiştir.

Kinematik veriler, tek bir Kinect v2 sensörü kullanılarak toplanmıştır. Bu sensör ile kaldırma hareketi sırasında 30Hz örnekleme hızında veriler toplanmıştır. Kinetik analizde yer reaksiyon kuvvetlerini (GRF) ve momentleri (Medical GmbH · Almanya) tespit etmek için 100 Hz örnekleme hızına sahip Zebris FDM 2 platformu kullanılmıştır. Eklem açılarını ve momentlerini hesaplamak için ölçülen veriler OpenSim 4.0'da uygulanan standart bir kas-iskelet sistemi modelleme iş akışı kullanılarak işlenmiştir (Seth ve ark., 2018; Delp ve ark., 2007). Çalışmada kullanılan iskelet-kas modeli için Rajagopal ve ark. 2016, oluşturduğu kas-iskelet modeli referans alınmıştır. Kutunun etkisini modele eklemek için kutunun ağırlığının yarısı sağ ve sol elin kütesine eklenmiştir.

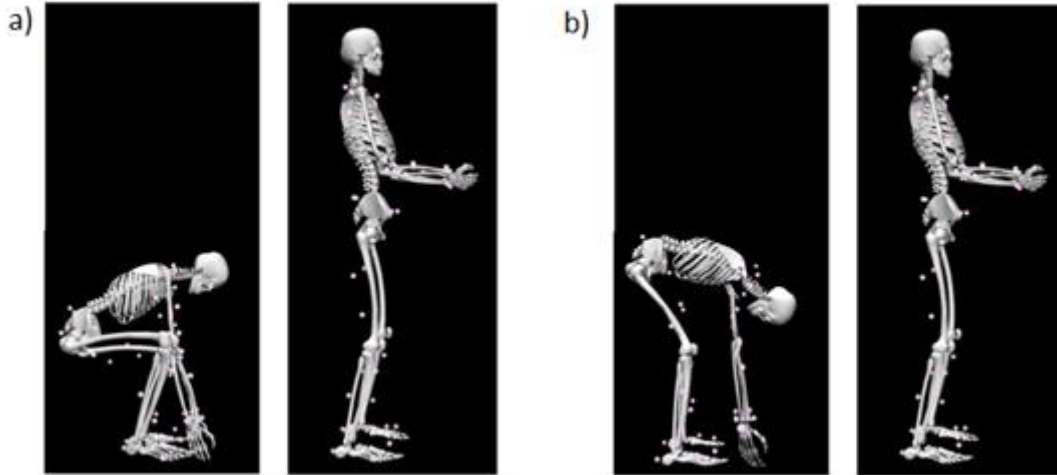
İlk olarak kullanılan iskelet-kas modeli, katılımcının antropometrisine göre ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirmeden sonra, üç boyutlu eklem açıları veya vücut eklem kinematiği oluşturmak için ters kinematik aracı kullanılmıştır. Burada Kinect v2'den insan vücut eklemlerinin konum verileri ve Zebris FDM 2 platformundan yer reaksiyon kuvveti (GRF) verileri OpenSim'deki biyomekanik insan modeline girilmiştir. Şekil 2'deki vücut eklem konum bilgisiyle ters kinematik hesaplama yöntemi kullanılarak vücut eklem açıları hesaplanmıştır (Rajagopal ve ark., 2016).

Daha sonra L5/S1 eklem momentlerini belirlemek için ters dinamik kullanılmıştır. Elde edilen verilerle OpenSim'in Ters Dinamik Aracı kullanılarak L5/S1 eklem momentleri hesaplanmıştır.

Ters Dinamik aracı tarafından elde edilen tam vücut hareketinde genelleştirilmiş konumları ( $q$ ), hızları ( $\dot{q}$ ) ve ivmeleri ( $\ddot{q}$ ) oluşturmak için gerekli olan her bir eklemdaki genelleştirilmiş kuvvetleri ( $t$ ) belirlemek için eşitlik (1) kullanılarak hareket denklemi çözülmüştür.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (1)$$

Kütle matrisinin ( $M$ ) ivmesinden kaynaklanan kuvvetlere ek olarak, Coriolis kuvvetleri ( $C$ ) ve yerçekimi kuvvetleri ( $G$ ) de dikkate alınmıştır.



Şekil 2. Biyomekanik modelin a) çömelerek ve b) eğilerek kaldırma hareketlerimin OpenSim yazılımındaki gösterimi

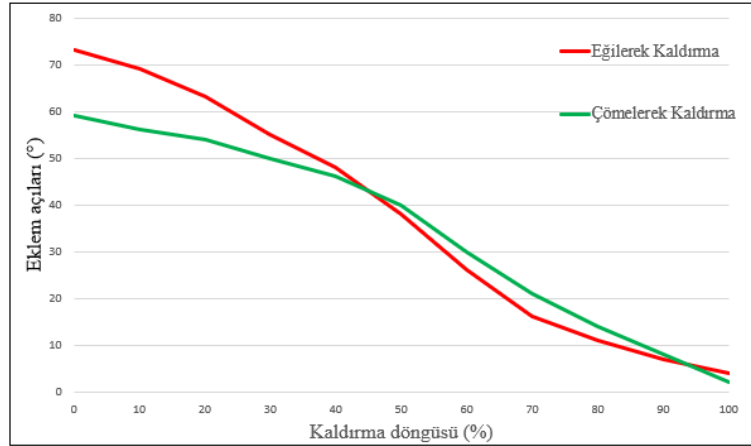
Son olarak, modele etki eden yüklerden türetilen birleştirilmiş gövdeler arasında aktarılan bileşke kuvvetleri hesaplamak için eklem reaksiyon analizi yapılmıştır. Lomber spinal yük, yerçekimi ivmesi ve eklem momenti girdisi ile dinamik denklemler çözümlenerek hesaplanmıştır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, elle yük kaldırma hareketinde kutu boyutlarının bireylerin bel bölgesi yaralanmalarında en yüksek riske sahip olan L5/S1 eklemine olan etkisi incelenmiştir. Kaldırma hareketi analizinde OpenSim yazılımında bir tüm vücut biyomekanik modeli kullanılmıştır. Kaldırma hareketi olarak iki farklı kaldırma tekniği olan çömelerek ve eğilerek kaldırma teknikleri esas alınmıştır. Çalışmaya 3 sağlıklı erkek katılımcı katılmıştır.

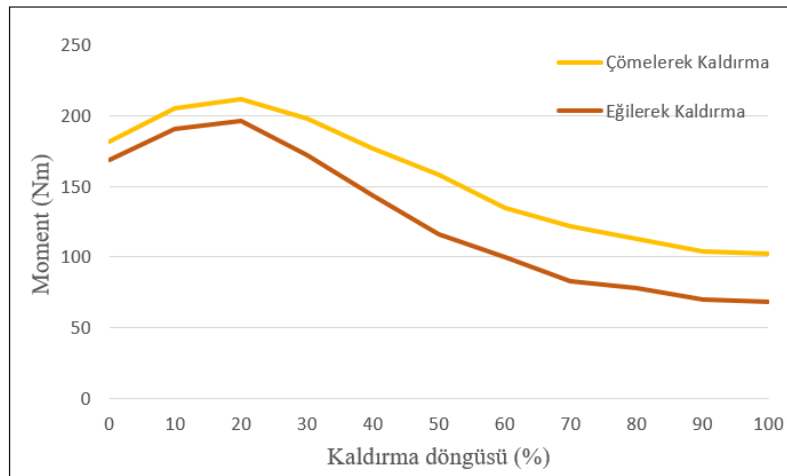
Katılımcılar kutuyu kendi rahat kaldırma hızında gerçekleştirmiştir. 16 kg kütleli küçük, orta ve büyük kutuların eğilerek ve çömelerek kaldırma hareketinde lomber (bel) bölgenin eklem hareket açıklığı değerleri küçük, orta ve büyük kutularda oldukça benzer olup Şekil 3'te gösterilmiştir. Bel

bölgesi eklem açısı değerlerinde küçük, orta ve büyük kutularda eğilerek ve çömelerek kaldırma teknikleri arasında önemli ölçüde farklı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3. Çömelerek ve eğilerek kaldırma hareketinde lomber eklem açıları

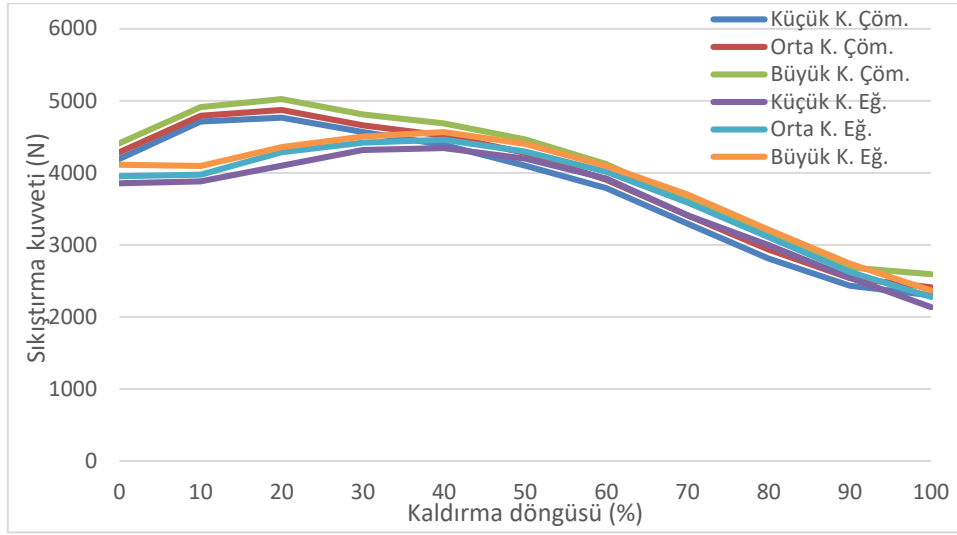
Çömelerek ve eğilerek kaldırma sırasında farklı kutu boyutları için L5/S1 eklemi momentleri Şekil 4'te gösterilmiştir. L5/S1 eklem kuvvetinde sıkıştırma, kesme kuvvetleri ve ekstansiyon momenti tepe değerleri, kaldırmadan hemen sonra meydana geldi (Şekil 4-6). Çömelerek kaldırmadaki moment değerleri kaldırma süresince eğilerek kaldırmadan daha fazlaydı. 16 kg kütle kaldırma hareketinde L5/S1 eklemi moment değerleri incelendiğinde çömelerek kaldırmaya göre küçük, orta ve büyük mega kutu boyutlarında %8.5-9.3 arasında arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 4. Çömelerek ve eğilerek kaldırma hareketinde L5/S1 ekstansiyon momentleri

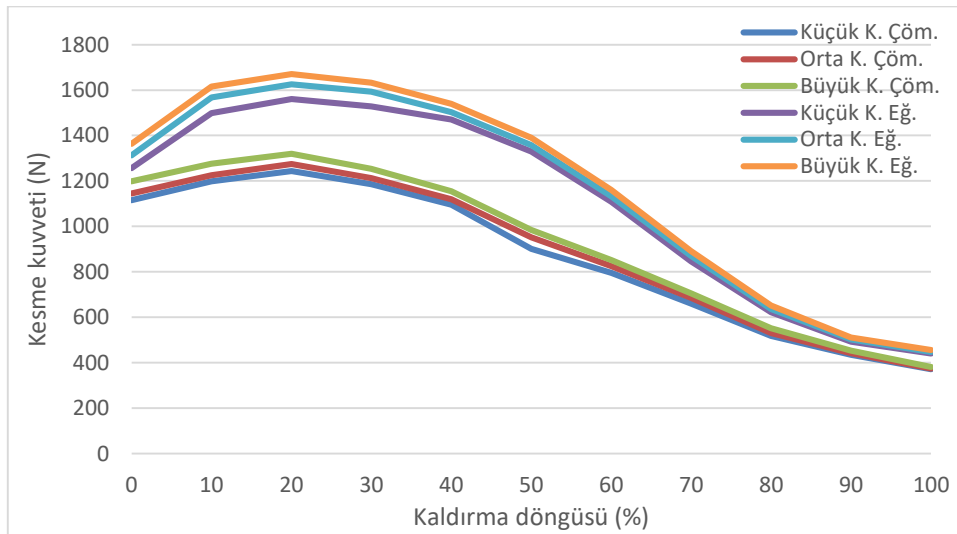
Kaldırma hareketinde L5/S1 eklemi kompresyon kuvvetleri tepe değerleri incelendiğinde eğilerek kaldırmada 4418N ile 4627N (birim kg başına N değerleri; 56.64 N/kg – 59.32 N/kg) ve çömelerek kaldırmada 4833N ile 5029N (61.96 N/kg – 64.47 N/kg) arasında olduğu ve çömelerek kaldırmaya göre küçük, orta ve büyük kutu boyutlarında %8.8-9.1-9.6 arasında arttığı tespit edilmiştir (Şekil 5).





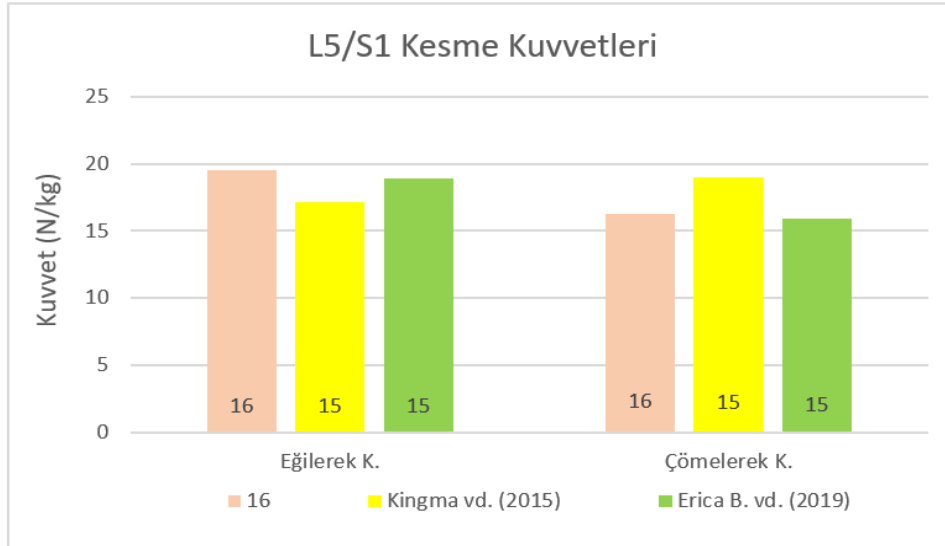
Şekil 5. Çömelerek ve eğilerek kaldırma hareketinde L5/S1 eklemi kompresyon kuvvetleri

Kaldırma hareketinde L5/S1 eklemi kesme kuvvetleri tepe değerleri incelendiğinde eğilerek kaldırmada 1568N ile 1693N (birim kg başına N değerleri; 20.11 N/kg – 21.71 N/kg) ve çömelerek kaldırmada 1249N ile 1359N (16.02 N/kg – 17.42 N/kg) arasında olduğu ve çömelerek kaldırmanın eğilerek kaldırmaya göre küçük, orta ve büyük kutu boyutlarında %24.5-25.7-27.4 arasında azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 6).



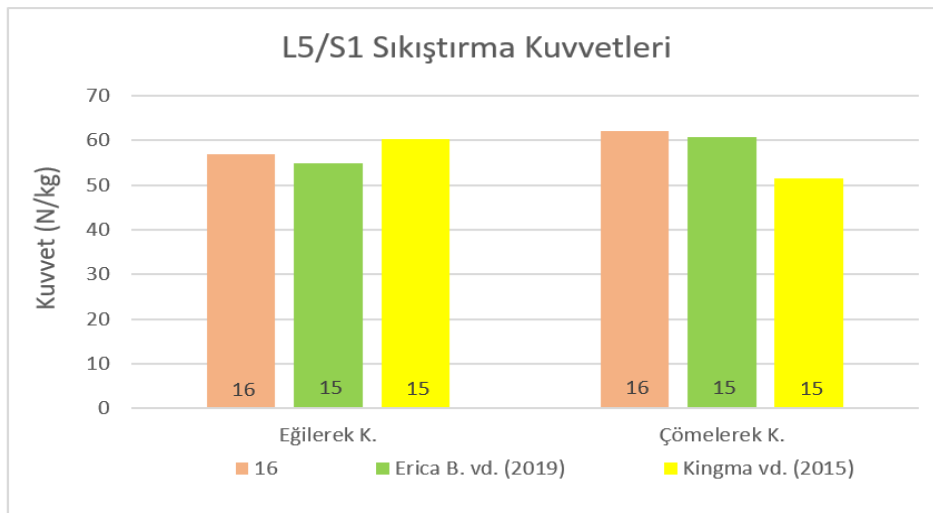
Şekil 6. Çömelerek ve eğilerek kaldırma hareketinde L5/S1 eklemi kesme kuvvetleri

Bu bulgular birim kg başına N değerleri olarak değerlendirildiğinde, Beaucage- Gauvreau ve ark. tarafından benzer katılımcı ve görevler için yapılan çalışmalarla Şekil 7'de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda kesme kuvveti sonuçlarımız, 16kg için eğilerek ve çömelerek kaldırmada sırasıyla %3.1-2.5 yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak Beaucage- Gauvreau ve ark.'nın yapmış olduğu çalışmada kaldırılan yükün 15kg olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kingma ve ark.larının çalışmasında kaldırılan yükün 15kg olduğu ve tutamaç yüksekliğinden dolayı çalışmamızdaki kesme kuvveti değerleriyle kıyaslandığında eğilerek kaldırmada %11.8 yüksek olduğu, çömelerek kaldırmada ise %16.6 düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca bu farklılığın nedeni olarak çalışmamızda kaldırma hareketinin kutu altından yapılarak L5/S1 eklemi moment kolunun uzaması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7. Çömelerek ve eğilerek kaldırma hareketinde L5/S1 eklemi kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Sıkıştırma kuvvetlerini Beaucage- Gauvreau ve ark.nın çalışmasıyla karşılaştırdığımızda sonuçlarımız, 16kg için eğilerek ve çömelerek kaldırmada sırasıyla %3.5-2.3 yüksek olduğu Şekil 8'de tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak Beaucage- Gauvreau ve ark.'nın yapmış olduğu çalışmada kaldırılan yükün 15kg olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kingma ve ark.larının çalışmasında kaldırılan yükün 15kg olduğu ve tutamaç yüksekliğinden dolayı çalışmamızdaki kesme kuvveti değerleriyle kıyaslandığında eğilerek kaldırmada %6 düşük olduğu, çömelerek kaldırmada ise %16.8 yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca bu farklılığın nedeni olarak çalışmamızda kaldırma hareketinin kutu altından yapılarak L5/S1 eklemi moment kolunun uzaması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 8. Çömelerek ve eğilerek kaldırma hareketinde L5/S1 eklemi sıkıştırma kuvvetlerinin karşılaştırılması.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, elle yük kaldırma hareketinin bireylerin bel bölgesi yaralanmalarında en yüksek riske sahip olan L5/S1 eklemine olan etkisi incelenmiştir. 16 kg kütleli küçük, orta ve büyük kutuların altından tutularak zeminden kaldırma hareketi esnasında L5/S1 eklemine oluşturduğu yüklenmeler hesaplanmıştır. Kaldırma hareketi analizinde OpenSim yazılımında bir tüm vücut biyomekanik

modeli kullanılmıştır. Kaldırma hareketi olarak iki farklı kaldırma tekniği olan çömelerek ve eğilerek kaldırma teknikleri esas alınmıştır.

Deneyler sonucunda küçük, orta ve büyük kutularda çömelerek kaldırma hareketinde L5/S1 eklemine etkiyen sıkıştırma kuvvetleri, eğilerek kaldırmaya göre sırasıyla %8.8-9.1-9.6 oranında artış, eğilerek kaldırma hareketinde L5/S1 eklemine etkiyen kesme kuvvetleri, çömelerek kaldırmaya göre sırasıyla %24.5-25.7-27.4 oranında artış göstermiştir. Kutu ebatlarındaki artış, eğilerek ve çömelerek kaldırma hareketlerinde kesme kuvveti ve sıkıştırma kuvvetlerinin artmasına neden olmuştur.

Kesme ve sıkıştırma kuvvet sonuçları eğilerek ve çömelerek kaldırma için Beaucage- Gauvreau ve ark. tarafından bulunanlara benzerdi. Kesme kuvvetleri için model tahminlerinin büyüklüğü, eğilerek kaldırmada Kingma ve ark. tarafından elde edilenlerden daha yüksek, çömelerek kaldırmada ise daha düşük bulunmuştur. Sıkıştırma kuvvetleri için model tahminlerinin büyüklüğü ise eğilerek kaldırmada Kingma ve ark. tarafından elde edilenlerden daha düşük, çömelerek kaldırmada ise daha yüksek bulunmuştur.

OpenSim yazılımının ve biyomekanik modellemelerin açık kaynak kodlu olması ve dünya çapında çalışmalarda kullanılmış olması, çalışmada kullanılan model ve yazılımı güvenilir kılmaktadır.

## 5. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## 6. YAZAR KATKISI

Melih CANLIDİNÇ ve Mustafa GÜLEŞEN çalışmanın deneysel tasarım süreçlerinde, deneylerin yapılmasında, sonuçların elde edilerek biyomekanik modele aktarılması ve sonuçların elde edilerek yorumlanması süreçlerine katkı sağlamıştır.

## 7. KAYNAKLAR

- Bazrgari B., Shirazi-Adl A., and Arjmand N., Analysis of squat and stoop dynamic liftings: Muscle forces and internal spinal loads, *European Spine Journal* 16(5), 687–699, 2007.
- Beaucage-Gauvreau E., Robertson W.S.P., Brandon S.C.E., Fraser R., Freeman B.J.C., Graham R.B., Thewlis D., Jones C.F., Validation of an OpenSim full-body model with detailed lumbar spine for estimating lower lumbar spine loads during symmetric and asymmetric lifting tasks, *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.* 22(5), 451–464, 2019.
- Bruno A.G., Bouxsein M.L., Anderson D.E., Development and validation of a musculoskeletal model of the fully articulated thoracolumbar spine and rib cage, *J. Biomech. Eng.*, 137(8), 1–10, 2015.
- Bureau of Labor Statistics, *Industry Injury and Illness Data*, 2019.
- Delp S.L., Anderson F.C., Arnold A.S., Loan P., Habib A., John C.T., Guendelman E., Thelen D. G., OpenSim: Open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 54(11), 1940–1950, 2007.
- Dreischarf M., Rohlmann A., Graichen F., Bergmann G., Schmidt H., In vivo loads on a vertebral body replacement during different lifting techniques, *J. Biomech.* 49(6), 890– 895, 2016.

- Faber G.S., Kingma I., Bakker A.J.M., van Dieën J.H., Low-back loading in lifting two loads beside the body compared to lifting one load in front of the body, *J. Biomech.* 42(1), 35–41, 2009.
- Faber G.S., Kingma I., Chang C.C., Dennerlein J.T., van Dieën J.H., Validation of a wearable system for 3D ambulatory L5/S1 moment assessment during manual lifting using instrumented shoes and an inertial sensor suit, *J. Biomech.* 102, 2020.
- Gholipour A., Arjmand N., Artificial neural networks to predict 3D spinal posture in reaching and lifting activities; Applications in biomechanical models, *J. Biomech.*, 49(13), 2946–2952, 2016.
- Hwang S., Kim Y., Kim Y., Lower extremity joint kinetics and lumbar curvature during squat and stoop lifting, *BMC Musculoskelet. Disord.* 10(1), 1–10, 2009.
- Jia B., Kim S., and Nussbaum M. A., An EMG-based model to estimate lumbar muscle forces and spinal loads during complex, high-effort tasks: Development and application to residential construction using prefabricated walls, *Int. J. Ind. Ergon.* 41(5), 437–446, 2011.
- Khoddam-Khorasani P., Arjmand N., Shirazi-Adl A., Effect of changes in the lumbar posture in lifting on trunk muscle and spinal loads: A combined in vivo, musculoskeletal, and finite element model study, *J. Biomech.* 104, 2020.
- Kingma I., Faber G.S., van Dieën J.H., Supporting the upper body with the hand on the thigh reduces back loading during lifting, *J. Biomech.*, 49(6), 881–889, 2016.
- Koopman A.S., Kingma I., Faber G.S., Bornmann J., van Dieën J.H., Estimating the L5/S1 flexion/extension moment in symmetrical lifting using a simplified ambulatory measurement system, *J. Biomech.* 70, 242–248, 2018.
- Matthew R.P., Seko S., Bajcsy R., Lotz J., Kinematic and Kinetic Validation of an Improved Depth Camera Motion Assessment System Using Rigid Bodies, *IEEE J. Biomed. Heal. informatics* 23(4), 1784–1793, 2019.
- McGill S.M., Marshall L., Andersen J., Low back loads while walking and carrying: Comparing the load carried in one hand or in both hands, *Ergonomics* 56(2), 293–302, 2013.
- Plamondon A., Gagnon M., Gravel D., Moments at the L5/S1 joint during asymmetrical lifting: effects of different load trajectories and initial load positions, *Clin. Biomech.* 10(3), 128–136, 1995.
- Rajae M.A., Arjmand N., Shirazi-Adl A., Plamondon A., Schmidt H., Comparative evaluation of six quantitative lifting tools to estimate spine loads during static activities, *Appl. Ergon.* 48, 22–32, 2015.
- Rajagopal A., Dembia C.L., DeMers M.S., Delp D.D., Hicks J.L., Delp S.L., Full-Body Musculoskeletal Model for Muscle-Driven Simulation of Human Gait, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 63(10), 2068–2079, 2016.
- Roosbahani H., Alizadeh M., Ustinov S., Handroos H., Development of a novel real-time simulation of human skeleton/muscles, *J. Biomech.* 114, 2021.
- Seth A., Hicks J.L., Uchida T.K., Habib A., Dembia C.L., Dunne J.J., Ong C.F., DeMers M., Rajagopal A., Millard M., Hamner S.R., Arnold E.M., Yong J.R., Lakshmikanth S.K., Sherman M.A., Ku J.P., Delp S.L., OpenSim: Simulating musculoskeletal dynamics and neuromuscular control to study human and animal movement, *PLoS Comput. Biol.* 14(7), 2018.
- Vilas-Boas M. C., Choupina H.M.P., Rocha A.P., Fernandes J.M., Cunha, J.P.S., Full-body motion assessment: Concurrent validation of two body tracking depth sensors versus a gold standard system during gait, *J. Biomech.* 87, 189–196, 2019.

**Araştırma Makalesi / Research Article**

**Comparison of Welded Joint Stress with Experimental and Finite Element Method Using of Hotspot Method**

Osman Bahadır ÖZDEN<sup>1\*</sup>, Barış GÖKÇE<sup>2</sup>, Abdullah ERDEMİR<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MPG Machinery Production Group Co., Konya, Türkiye,

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0003-1231-2936>, bozden@mpg.com.tr

<sup>2</sup> Mechatronic Engineering Department, Necmettin Erbakan University, Konya, Türkiye,

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0001-6141-7625>, bgokce@erbakan.edu.tr

<sup>3</sup> MPG Machinery Production Group Co., Konya, Türkiye,

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-7267-3111>, aerdemir@mpg.com.tr

**Geliş/ Received:** 13.05.2022;

**Kabul / Accepted:** 14.12.2022

**ABSTRACT:** The purpose of the welded structures is to combine the two different structures defined as the workpiece and the main material in order to ensure that they remain in the elastic deformation zone by meeting the loading conditions safely. Welding parameters such as preheating, welding speed, shielding gas selection, filler wire selection, voltage, current values affect the mechanical properties of the HAZ zone and the general structure, especially when welding fine-grained structural steels are performed. Strain gauge sensors can give normal stress and shear stress values for structures forced by static loadings depending on the stable x, y, z axes. The hotspot stress method used with the finite element method gives closer results to experimental studies. In this study, two different S960QL steels were combined with workpiece and main material using MAG welding. Data were taken from the strain gauge sensor connected to the samples prepared by the hotspot stress method. Using the finite element method, different types of models were analyzed and experimental data were compared with analysis outputs. As a result of the comparison, the most accurate welded joint analysis modeling with the hotspot method has been determined by the results of the experiment and analysis and has been proven with an accuracy rate of 89%.

**Keywords:** Finite Element Method, Welded Joint Stress, Hotspot Stress, Strain Gauge Sensor.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: bozden@mpg.com.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Özden O.B., Gökçe B., Erdemir A. (2023). Comparison of Welded Joint Stress with Experimental and Finite Element Method Using of Hotspot Method. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 11-22.

## Hotspot Yöntemi Kullanılarak Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kaynaklı Bağlantı Gerilmelerinin Karşılaştırılması

**ÖZET:** Kaynaklı yapıların amacı, iş parçası ve ana malzeme olarak tanımlanan iki farklı yapıyı birleştirmek ve yükleme koşullarını güvenli bir şekilde karşılayarak elastik deformasyon bölgesinde kalmalarını sağlamaktır. Özellikle ince taneli yapı çeliklerinin kaynağı yapılırken ön ısıtma, kaynak hızı, koruyucu gaz seçimi, dolgu teli seçimi, gerilim, akım değerleri gibi kaynak parametreleri HAZ bölgesinin mekanik özelliklerini ve genel yapıyı etkilemektedir. Gerinim ölçer sensörler, x, y, z eksenine bağlı olarak statik yükler tarafından zorlanan yapılar için normal gerilme ve kayma gerilme değerlerini verebilmektedir. Kaynaklı bağlantılarda hotspot gerilme yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel çalışmalarda daha doğru sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada iki farklı numunede S960QL çeliği, MAG kaynağı kullanılarak iş parçası ve ana malzeme birleştirilmiştir. Hotspot gerilme yöntemi ile hazırlanan numunelere bağlı gerinim ölçer sensörlerinden veriler alınmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak farklı parametrelerde modeller analiz edilmiş ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda hotspot gerilme yöntemi ile en doğru kaynaklı bağlantı analizi modellemesi deney ve analiz sonuçları ile belirlenmiş ve %89 doğruluk oranı ile kanıtlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Sonlu Elemanlar Metodu, Kaynaklı Bağlantılarda Gerilme, Hotspot Gerilme, Gerinim Ölçer Sensör.

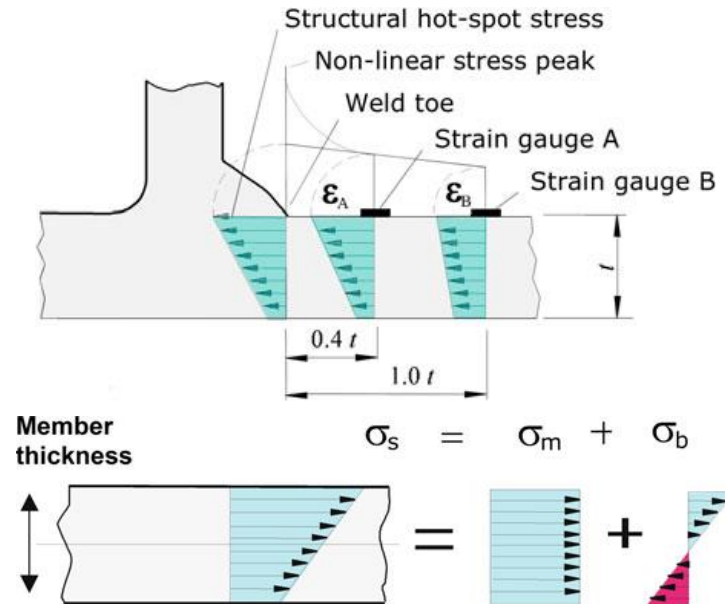
### 1. INTRODUCTION

Finite element analysis in welded joints is performed using many different modeling techniques. The results of the applied finite element modelling methods can cause great changes. The International Welding Institute proposes four methods including the hotspot stress method for the structural stresses and fatigue life values occurring at the welding toe and at the weld root (Niemi et al., 2018). Scientific studies conducted in recent years show that the hotspot method gives results closer to the tests performed (Iqbal et al., 2020). Calculation of analytical formulations is not effective due to the discontinuities and hotspot stresses occurring in the weld seam. If the structures are complex, and due to some basic formulation deficiency, finite element analysis reveals more practical and accurate results (Ali et al., 2020; Meyghani et al., 2019). Different finite element modeling techniques are used in hotspot stress calculations and the stresses are calculated in the most ideal way (Iqbal et al., 2020). If the discontinuities that will occur in the weld pool are included in the calculations, the stress value should be multiplied by the stress magnification factor ( $k_m$ ) (Hobbacher, 2016).

By using the hotspot stress method, fatigue life calculations can also be made with the forces under static and dynamic loads in the weld seam. For the fatigue life, values are determined according to the FAT tables found in IIW documents according to the workpiece to be welded and the main material form (Dong et al., 2019; Shin et al., 2021). Finite element welding modeling can be done in 2 different types as shell modeling and solid modeling (Niemi et al., 2018). There are also different modeling variants for shell and solid modeling. The shape of the structure affects the results of the solid and shell modeling technique. (Kim et al., 2015; Yamamoto et al., 2020). However, some shell modeling techniques in studies gave results close to 88% accuracy to according to some experimental results (Büyükbayram et al., 2015).

Strain gauge sensors are used to measure the strain values in local areas and according to the Hooke's law, the elasticity modulus and stress values of the material are found. It is used to measure

the residual stresses in welded joints and to measure the local stresses as a result of static and dynamic loads (Feng et al., 2020; Li et al., 2017). It has different types of bridging and strain gauge strain measurement studies with Wheatstone bridging type are generally performed in studies (Güven & Rende, 2020).



**Figure 1.** Hotspot stress linear extrapolation and linearized stress (Niemi et al., 2018)

In experimental studies, hotspot stress at the welding tip can be measured by sticking 2 strain gauges at  $0.4t$  and  $1t$  distances as strain gauge positions, where  $t$  is the thickness of the metal. In finite element analysis, the same stress value can be obtained by using fine mesh. In Ansys Mechanical, the sum of membrane and bending stress is determined with linearized stress, and linear extrapolation is made to the welding toe for 2 different locations. Figure 1 shows that hotspot stress linear extrapolation and linearized stress, and linear extrapolation is made to the welding toe for 2 different locations.

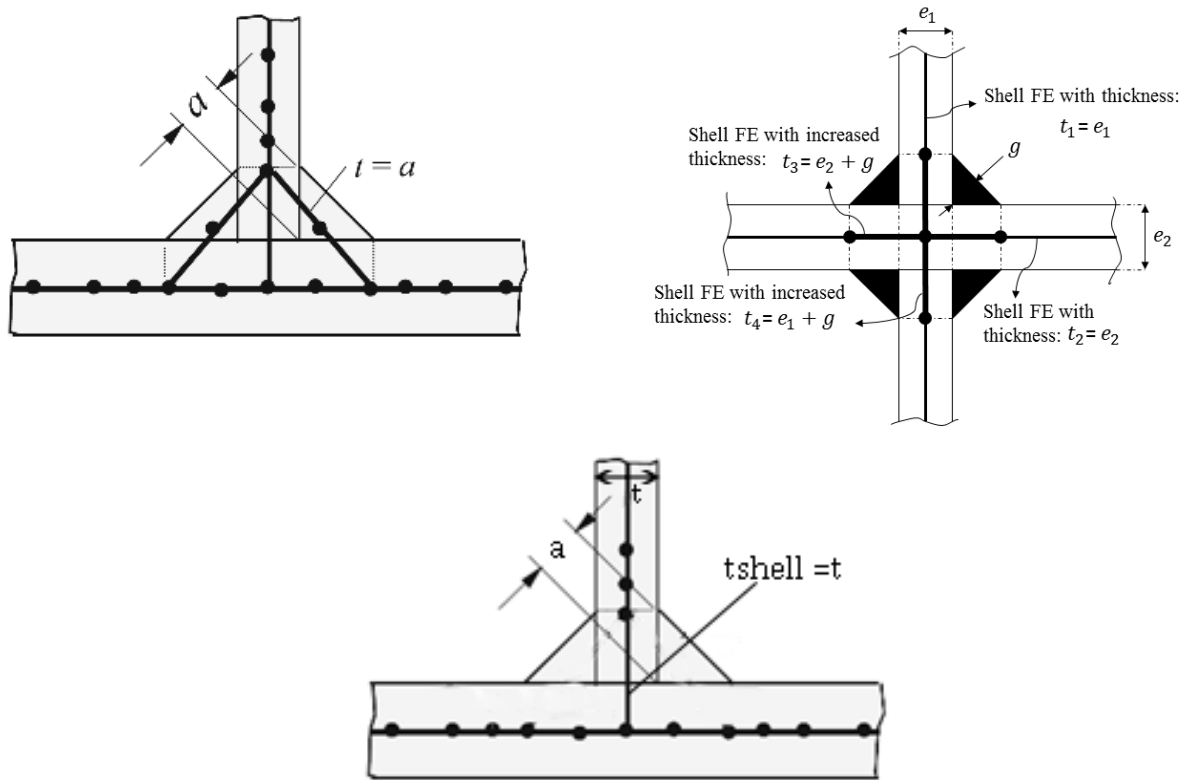
In test studies, the hotspot stress is calculated according to Equation (1) by taking linear extrapolation from A and B positions given in Figure 1 and the size of maximum element is  $0.4t$  in finite element model (Niemi et al., 2018):

$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1t} \tag{1}$$

According to the quadratic extrapolation used in bending stresses in the finite element method, the hotspot stress at maximum  $0.4t$  mesh element size is calculated according to Equation (2) (Niemi et al., 2018):

$$\sigma_{hs} = 2.52\sigma_{0.4t} - 2.24\sigma_{0.9t} + 0.72\sigma_{1.4t} \tag{2}$$

While shell modeling of the welded joint in the finite element method, it may vary depending on the shape of the weld seam in cases such as double sided, single sided, full penetration and half penetration. Double sided, half penetration and full penetration FEM (Finite Element Method) of welded joint models are shown in Figure 2:



**Figure 2.** Double side, half penetration and full penetration FEM welded joint models (Eriksson et al., 2003; Niemi et al., 2018).

In the finite element method, singularity can affect the results while evaluating. While solid modeling the of welded joint, this situation should be considered while obtaining hotspot stress and results.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Experimental Setup and Materials

In the tests performed, the welding processes were applied to the S960QL steel for each material. In structures with high moment and axial load requirements such as mobile cranes, this type of ultra-high strength fine grain structural steel is preferred and therefore S960QL was chosen for this purpose. In order to compare the samples, parts with 2 different weld lengths were used. Both samples were made in one pass and the same welding parameters were used for comparison purposes. Table 1 shows the chemical compositions of S960QL.

**Table 1.** S960QL Chemical compositions

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	V %	Ti %	Cu %
0.17	0.22	1.24	0.01	0.001	0.2	0.06	0.597	0.04	0.002	0.02

The filler material used for the welding process was low alloyed OK AristoRod 89 (ESAB) welding wire; its mechanical properties, which is given in Table 3, do not exceed the mechanical properties of S960QL. The filling material OK AristoRod 89 has a yield strength of 920 MPa and a tensile strength of 940 MPa. Table 2 shows the chemical compositions of OK AristoRod 89 welding filler metal.



**Table 2.** OK Aristorod 89 Chemical compositions

<b>Element</b>	<b>Percentage of Content (%)</b>
C	0.17
Si	0.80
Mn	1.75
Cr	0.41
Ni	2.22
Mo	0.53

Throat thickness in welded joints may vary depending on welding parameters. Welding parameters were determined according to the welding thickness specified in the study. Table 4 shows the welding parameters.

**Table 3.** Mechanical Properties of S960QL

<b>Element</b>	<b>Value</b>
Yield Strength - Rp <sub>0.2</sub> - MPa	1027
Elasticity Modulus - E - GPa	203.4
Tensile Strength - Rm - MPa	1066
Elongation – A5 - %	16
Poisson Ratio - $\nu$	0.33

M21 (80% Ar, 20% CO<sub>2</sub>) gas mixture was chosen as shielding gas. Due to the discontinuities that may occur in the weld seam after welding, the most ideal weld seam samples were prepared and made available for testing by performing visual inspection, penetration test and ultrasonic test.

**Table 4.** Welding Parameters

<b>Parameter</b>	<b>Sample 1</b>	<b>Sample 2</b>
Weld Length – mm	20	30
Welding Throat Thickness – mm	3	3
Pre heating - °C	100	100
Voltage - V	20 – 25	20 – 25
Current - I	200 – 210	200 – 210
Arc Length - mm	5	5
Wire Feeding Speed - m/min	8	8

Figure 3 shows the experimental setup and data acquisition software interface. Hydraulic cylinders are used to break the weld seam in the experimental setup, and force values are acquired with the pressure sensors connected. Dewesoft software and data acquisition card were used in order to collect data from strain gauge and pressure sensors.

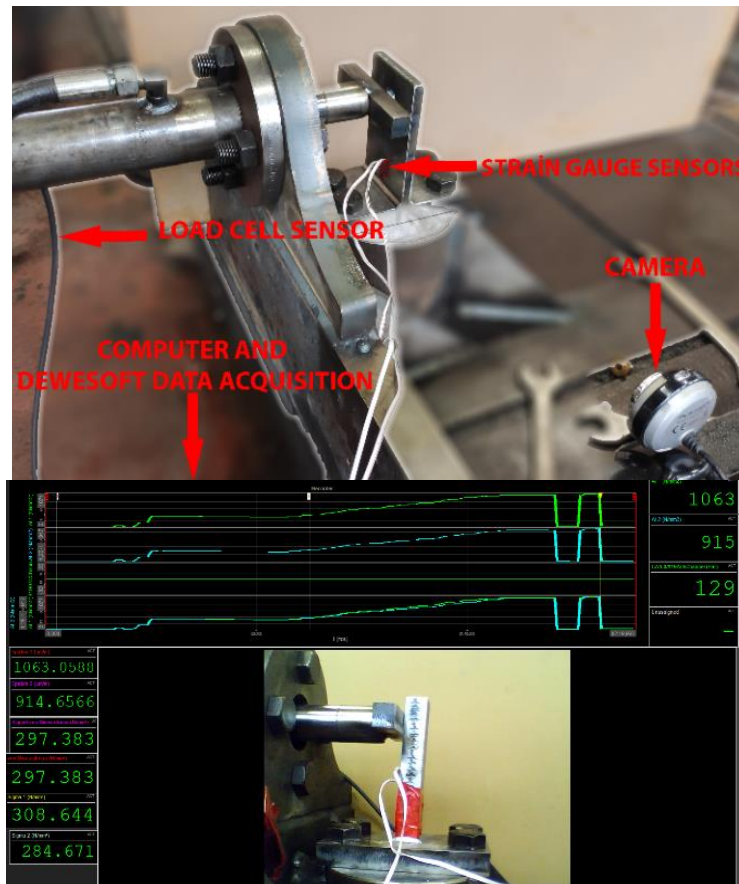


Figure 3. Experimental setup and software interface

The strain gauge locations on the sample are given in Figure 4. In the experiments, the sample thicknesses were chosen as 20 mm, and the 2 strain gauges were placed at 0.4t and 1t distances from the weld toe. In the finite element analysis, shell and solid modeling with maximum 0.4t element size were prepared and experimental data and analysis results were compared.

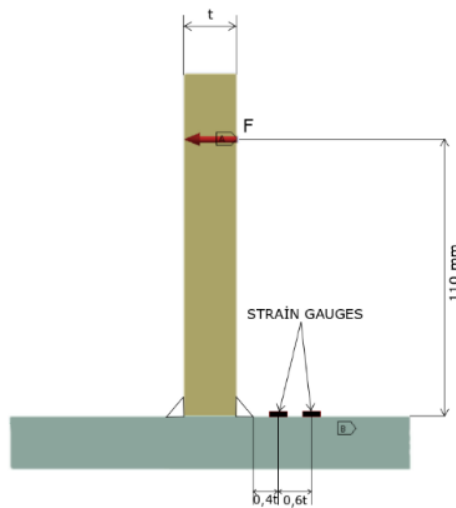
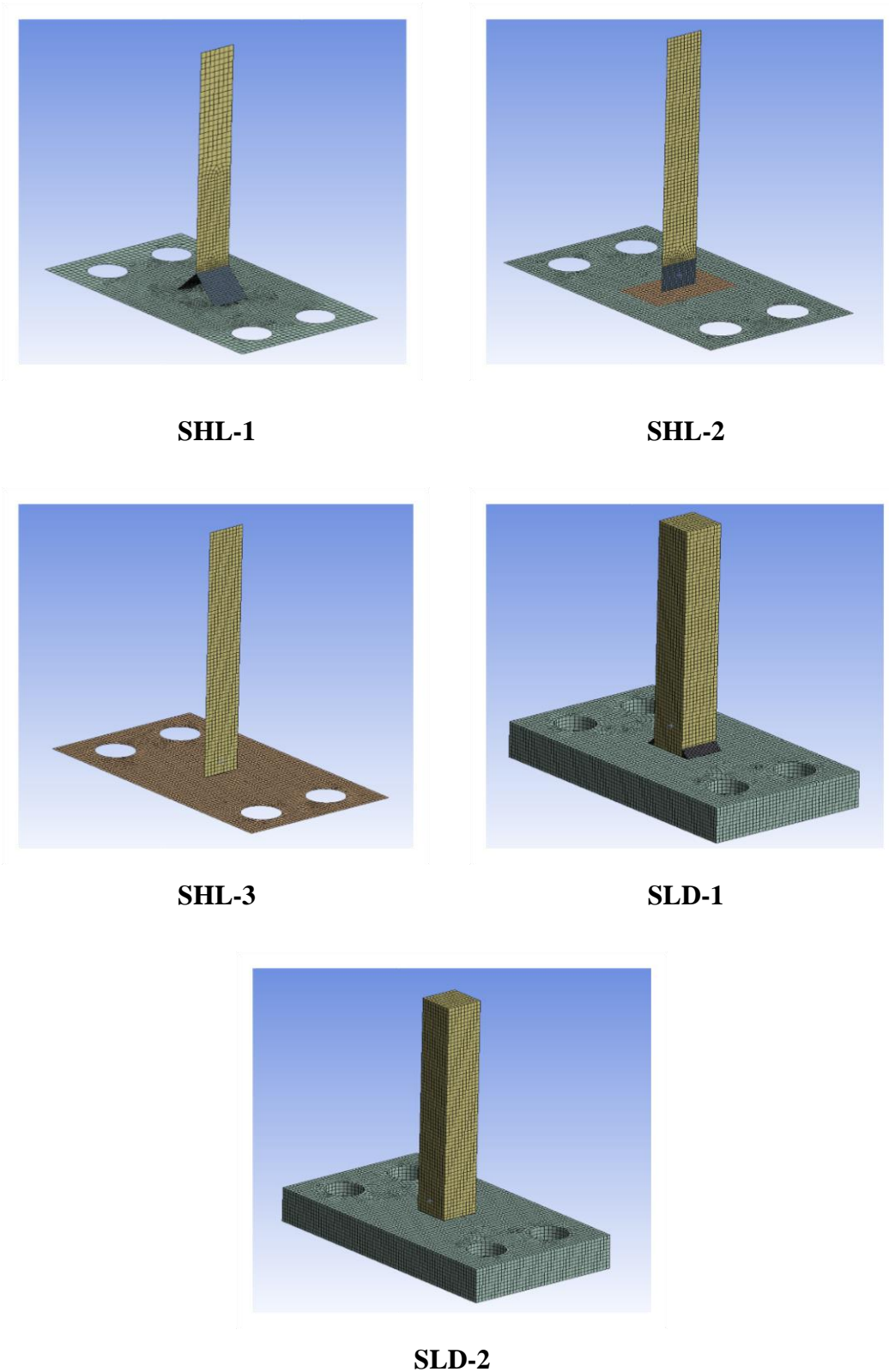


Figure 4. Strain gauge location and strained surface size in the simulation

### 2. 2. Welded Joint FEM Models

The contact areas are defined by share topology and frictional contact. Path definitions were made according to Equation (1) and Equation (2), and the stress values were taken from path points. Figure 5 shows the SHL and SLD FEM welding models prepared for the Finite Element Analysis.



**Figure 5.** Prepared SHL (Shell) and SLD (Solid) FEM welding models

SHL1-3 models are defined as shell, while, SLD1-2 models are defined as solid. The mesh qualities for the shell and solid models are the same, and the mesh element quality is 0.85. Mesh structure consist of 5852 nodes and 4854 elements for shell models, and 18247 nodes and 15864 elements for solid models. The maximum element size of the mesh is 4 mm, and quadratic – hexagonal mesh types were used in the models. For the evaluation of FEM analysis results, Equation (1) and Equation (2) were applied and results were obtained only for the break/failure points. Hotspot stress method gives results closer to the experiments.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

For verification, 2 different samples with weld lengths of 20 mm and 30 mm were prepared and a test setup was prepared for testing of these samples, and strain gauge sensors were attached to these samples according to the weld tip distances specified in the hotspot stress. In the hotspot stress method, force was applied until the specimen failed and normal stress values were collected. In FEM analysis, the same force values were defined according to different weld models and 2 different equations, and the results were analyzed. In FEM software, welded fasteners can be defined with different models as shell and solid. In this study, results were obtained according to different weld modeling as shell and solid in 2 different equations in the hotspot stress method. In complex structures, analytical calculation methods and calculating stress values in the weld area are not preferred in terms of time and difficulty, therefore FEM analysis is preferred. In the FEM model, the analysis modeling of welded structures may differ in the results. In order for welded structures to combine different structures and meet the forces coming to this structure safely, analyzes should be evaluated with the most accurate FEM welding model.

#### 3. 1. Results for Equation (1)

The results of Equation (1) applied for Sample 1 are given in Figure 6. As a result of the experiments, breaking of the weld occurred at 11138 N in Sample 1 and 16516 N in Sample 2. In Figure 6, for Equation (1), the closest results according to Sample 1 are SHL-3 and SHL-1 modeling. The accuracy rate was 68.34% for SHL-3 and 56.22% for SHL-1.

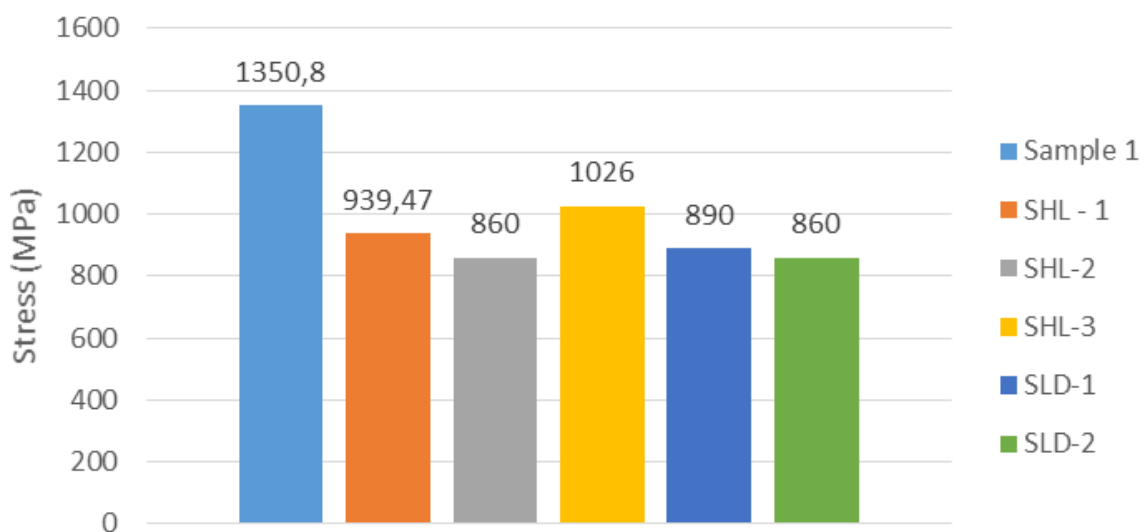


Figure 6. Results of Equation (1) for Sample 1.

In Figure 7, the analysis results of Sample 2 for Equation (1) are given. Accordingly, the closest results were SHL-3 and SHL-1 modeling. The accuracy rate was 86.20% for SHL-3 and 73.49% for SHL-1.

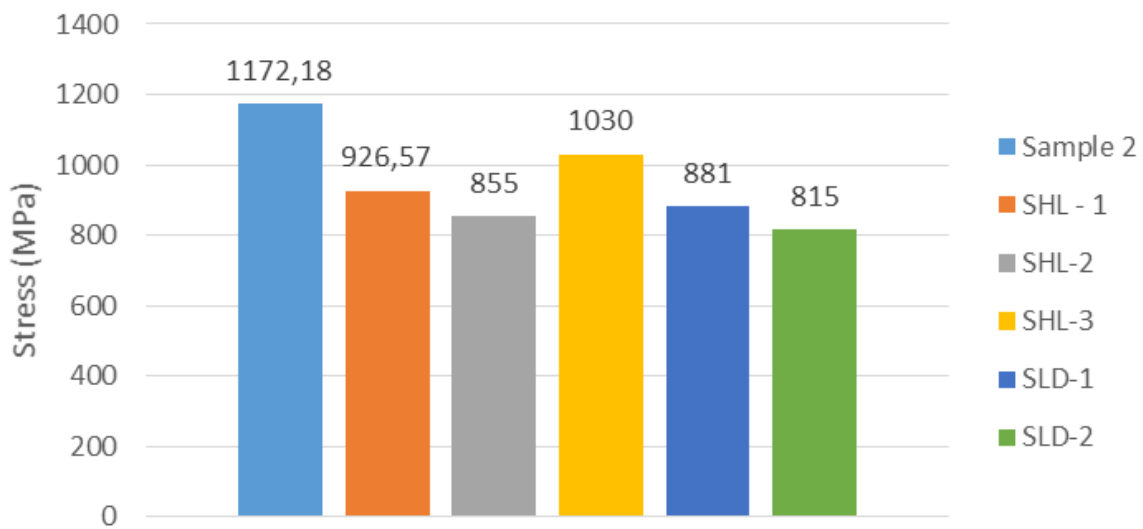


Figure 7. Results of Equation (1) for Sample 2.

### 3. 2. Results for Equation (2)

In Figure 8, results for Equation (2) are given according to Sample 1. Therefore, the closest results were SHL-3 and SHL-1 modeling. The accuracy rate was 71.21% for SHL-3 and 60.19% for SHL-1.

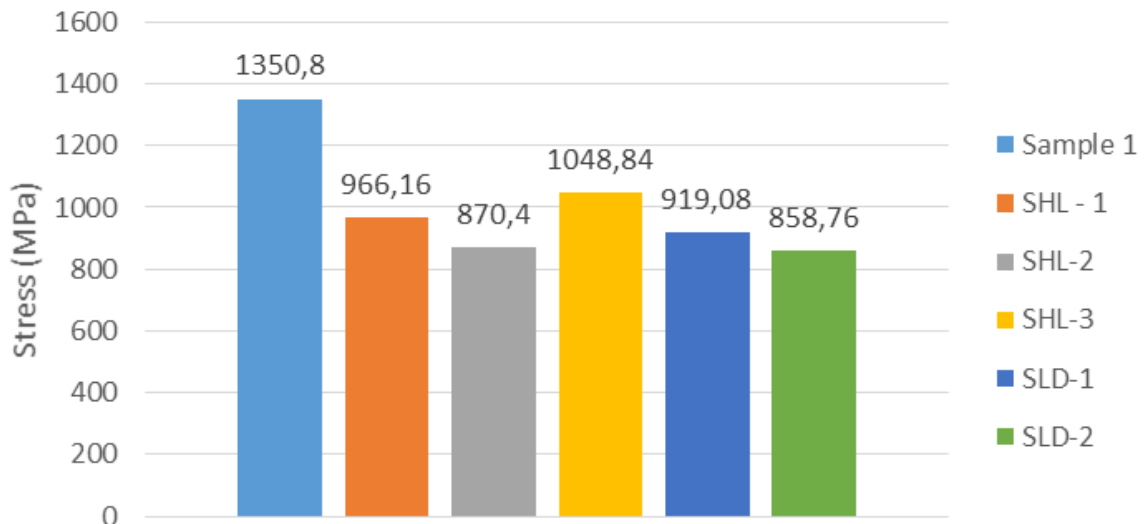


Figure 8. Results of Equation 2 for Sample 1

In Figure 9, the results for Equation (2) are given according to Sample 2. Hence, the closest results were SHL-3 and SHL-1 modeling. The accuracy rate was 89.47% for SHL-3 and 88.90% for SHL-1.

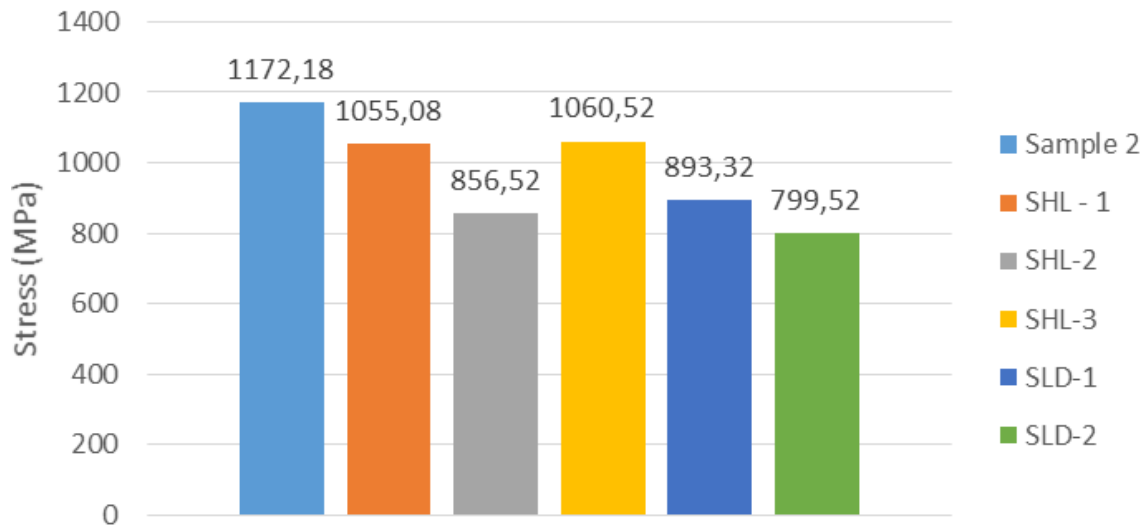


Figure 9. Results of Equation (2) for Sample 2

According to the destructive test results applied, their tensile strength was seen to be over 1172 MPa. According to the test results and a study by Schroepfer et al. (Schroepfer et al., 2015), it was determined that the HAZ region is suitable in terms of mechanical properties. Thus, welding parameters were evaluated appropriately. The fracture instant and test sample for the 2nd sample are shown in Figure 10, with an accuracy of 89.47% according to (a) SHL-3 FEM welded joint modeling approach and (b) test results. In a study performed as a dynamic analysis in the literature (Büyükbayram et al., 2015), it is seen that the SHL-2 model has an accuracy rate of approximately 88%. In this study, SHL-3 was combined from the edge of the workpiece to the surface of the main material with a bond called share topology in welding modeling. According to the other study in the literature, the difference is thought to be due to dynamic loading and bond type.

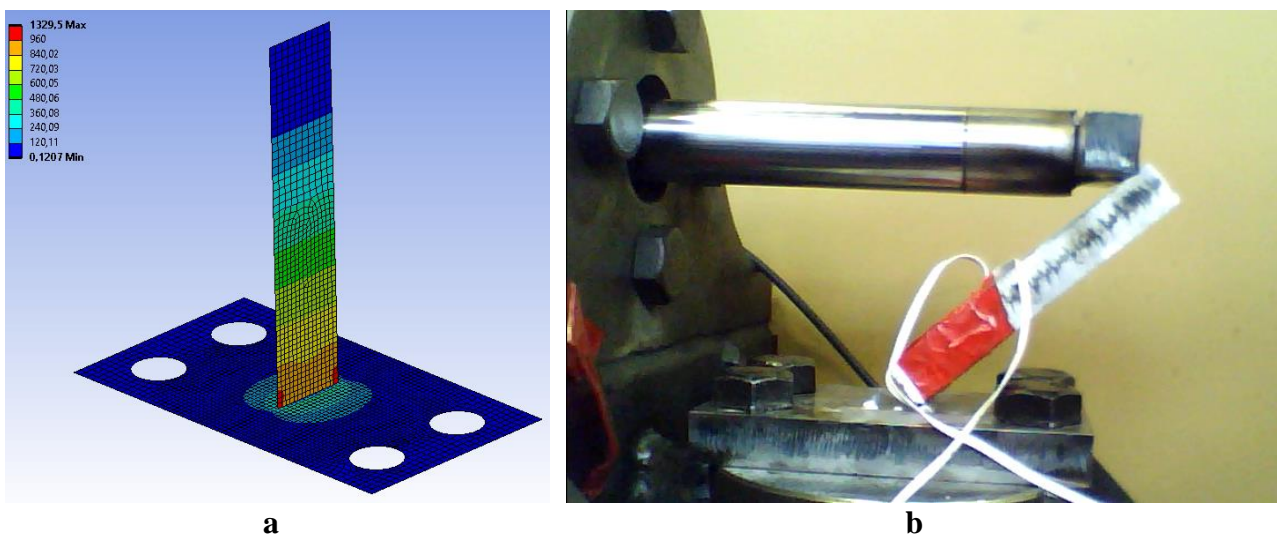


Figure 10. Instant of fracture (a) SHL-3 (b) Sample 2.

In FEM analyzes of structures with high moment and axial loads, especially attention should be paid to the selection of welded joint modeling type to ensure structural safety. As a result of this study, SHL-3 modeling with quadratic extrapolation is recommended for static analyzes.

#### 4. CONSLUSION

In this study, results were evaluated with 2 different equations with the stress values taken from different distances from the weld toe according to IIW documents in FEM software. According to the results obtained, it has been predicted that the same modeling can be used in complex structures. The results obtained as a result of experimental measurements with strain gauge according to prepared Sample 1 and Sample 2 were compared with the FEM analyze. According to the results:

1. Indicated in Figure 6, 7, 8 and 9, it was seen that SHL-3 and SHL-1 weld modeling gave more accurate with an accuracy rate of 89%.

2. According to the experiment forced by static loading, more accurate results were obtained according to the quadratic extrapolation equation given in Equation (2).

3. In the literature (Büyükbayram et al., 2015), it has been observed that some shell modeling techniques give results close to 88%, according to dynamically forced experimental results. In this study, which was performed statically, it is seen that SHL-3 and SHL-1 models made with share topology give more accurate results.

4. According to the welding parameters selected for S960QL ultra high strength steels, this design has been found to have sufficient tensile strength (1172 MPa).

#### 5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the support of “MPG Machinery Production Group Inc. Co.” in this study.

#### 6. CONFLICT OF INTEREST

Author(s) approve that to the best of their knowledge, there is not any conflict of interest or common interest with an institution/organization or a person that may affect the review process of the paper.

#### 7. AUTHOR CONSTRIBUTION

Osman Bahadır ÖZDEN contributed to the preparation of the experimental setup of the study, the realization of the FEM analysis, and the drafting of the article. Barış GÖKÇE contributed to the drafting of the article and to the criticism of the content. Abdullah ERDEMİR contributed to the drafting of the article and to the FEM analysis.

#### 8. REFERENCES

- Ali D., Abbas H., Abdullah T., Numerical analysis of stress distribution during tunneling in clay stone rock. *International Journal of Engineering* 33(8), 1472-1478i, 2020.
- Büyükbayram C., Koç B., Tekin G., Salihoğlu B., Fatigue strength evaluation approach of welded joints for more reliable and lighter military ground vehicles. *Procedia Engineering* 133, 485-500, 2015.
- Dong Y., Teixeira A., Soares C.G., Fatigue reliability analysis of butt welded joints with misalignments based on hotspot stress approach. *Marine Structures* 65, 215-228, 2019.
- Eriksson Å., Lignell A.-M., Olsson, C., Spennare, H., Weld evaluation using FEM: a guide to fatigue-loaded structures. *Industrilitteratur* 2003.

- Feng R., Tang C., Roy K., Chen Z., Chen B, Lim, J. B., An experimental study on stress concentration factors of stainless steel hybrid tubular K-joints. *Thin-Walled Structures* 157, 107064, 2020.
- Güven F., Rende H., An analysis of endurance limit-modifying factors depending on bead shape and thickness in load-carrying welded T-joints. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 42(2), 1-8, 2020.
- Hobbacher A., Recommendations for fatigue design of welded joints and components (Vol. 47). Springer, 2016.
- Iqbal N., Fang H., Naseem A., Kashif M., De Backer H., A numerical evaluation of structural hot-spot stress methods in rib-to-deck joint of orthotropic steel deck. *Applied Sciences* 10(19), 6924, 2020.
- Kim Y., Oh J.-S., Jeon S.-H., Novel hot spot stress calculations for welded joints using 3D solid finite elements. *Marine Structures* 44, 1-18, 2015.
- Li S., Ren S., Zhang Y., Deng D., Murakawa H., Numerical investigation of formation mechanism of welding residual stress in P92 steel multi-pass joints. *Journal of Materials Processing Technology* 244, 240-252, 2017.
- Meyghani B., Awang M., Wu C., Thermal analysis of friction stir welding with a complex curved welding seam. *International Journal of Engineering* 32(10), 1480-1484, 2019.
- Niemi E., Fricke W., Maddox S. J., The structural hot-spot stress approach to fatigue analysis. In *Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components* (pp. 5-12). Springer, 2018.
- Schroepfer D., Kromm A., Kannengiesser T., Improving welding stresses by filler metal and heat control selection in component-related butt joints of high-strength steel. *Welding in the World* 59(3), 455-464, 2015.
- Shin W., Chang K.-H., Muzaffer S., Fatigue analysis of cruciform welded joint with weld penetration defects. *Engineering Failure Analysis* 120, 105111, 2021.
- Yamamoto N., Sugimoto T., Ishibashi, K., Tanaka, S., A study on the type-b hot spot stress. *Welding in the World* 64(11), 1833-1842, 2020.



---

**Araştırma Makalesi / Research Article**

---

**The Use of Cu-W Sinters in MIG-MAG Welding Contact Tips for Improved Continuous Wire Abrasion Performance**

Mustafa YAZAR<sup>1\*</sup>, Şükrü TALAŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> R&D Center, Şahinkul Machine and Spare Parts Production Ltd. Co., Bursa, Turkey  
Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0001-9927-3268>, yazatmustafa08@gmail.com

<sup>2</sup> Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Afyonkarahisar, Turkey  
Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-4721-0844>, talas.sukru@gmail.com

**Geliş/ Received:** 09.11.2022;

**Kabul / Accepted:**27.12.2022

**ABSTRACT:** Gas metal arc welding is one of the most widely used welding methods in the industry. Especially when large volume welded manufacturing is required, this method is very successful and practical. The wear of the contact guides, which guide the wire at the tip of the welding torches, but most importantly, provide electrical current transmission, may cause the production time to be extended and the calibration period to be minimized. In this study, the most worn part of the contact guides used in the Gas Welding robots were assembled by making pins from doped and undoped copper powders using the powder metallurgy method. The wear performance was compared by making the obtained pin driven contact guides under mass production conditions. In the study, pressing and sintering processes were carried out with Cu and Cu+W powders. The hardness of the contact guides was characterized by their microstructure and XRD results. It was observed that CuW5 and CuW10 powder mixtures were more successful.

**Keywords:** Powder Metallurgy, Abrasion Resistance, MIG-MAG Welding Method, Contact Nozzle

---

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: yazatmustafa08@gmail.com

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Yazar M., Talaş Ş. (2023). The Use of Cu-W Sinters in MIG-MAG Welding Contact Tips for Improved Continuous Wire Abrasion Performance. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 23-37.

## 1. INTRODUCTION

Arc welding processes such as gas metal arc welding (also known as MIG/MAG) and gas tungsten arc welding (also widely referred to TIG), are commonly used in both manual and automatic welding operations of various structural materials, i.e. steels and stainless steels in industry (Durgutlu and Gulenç, 1999; Ezer and Cam, 2022; Serindag and Cam, 2022; Serindag et al, 2022). In the MIG/MAG welding method, the welding torch has been developed to carry out the tasks of transmitting the current from the power cable to the electrode, and also transferring the shielding gas to protect the weld pool and arc plasma. It is also a tool to create an electric arc between the workpiece and the tip of electrode required for sustaining the welding operation. MIG/MAG torches are in general made of copper alloy with a high current conductivity and reliable high temperature operation. However, the high welding current values used in robotic systems increase the average temperature in welding torches. This causes the temperature of torches and especially the contact runner or wire guide, which is in direct contact with the arc plasma, rise to significantly high temperatures and thus accelerates their wear rates tremendously (Kou, 2002; Adam et al., 2001; Shimizu et al., 2006). By coating the wire guide surface using the electro-spark method with the intermetallic materials, the amount of wear was highly reduced and the adhesion of metal droplets to the wire guide surface by splashing was also prevented to a large extent (Yazar et al., 2022). As in many mechanical systems with moving parts, such as machine, wear is the prime cause that leads to the operational failure. One of the solutions to this problem is to use wear resistant hard phases in materials with soft matrix. In hard phase containing composites, however, effects of applied load onto the surface, pin shear rate and volume fraction of second phase in the matrix have been studied to observe the shift in the wear behaviour between mild and severe modes, for example, in SiC reinforced copper matrix composites, increasing SiC ratio or decreasing the test shear rate under dry sliding wear, it delays the formation of severe wear up to the point where mild and severe transition is observed (Zhang et al., 2008; Singla et al., 2009). SiC particles in the metal matrix composite usually act as the load bearing artefact and reduce the extent of frictional deformation in the subsurface region. The separation of the metal matrix and damaged subsurface region due to microcrack propagation during repeated loads is the primary wear mechanism. The heat generated during the sliding operation, i.e. thermally activated subsurface deformation plays an important role in tearing and separating the surface layer from the substrate material, which is the case for severe wear condition (Zhang et al., 2008; Gautam et al., 2008). As in SiC reinforced metal matrix composites, ceramic particle reinforcements can also improve high-temperature mechanical properties as well as their wear properties without severely deteriorating the electrical and thermal conductivity of the matrix. Therefore, second phase particle-reinforced copper matrix composites are of interest in many industrial applications such as switch or relay contact materials, load bearing wear-resistant and heat-resistant materials, brush materials, and torch nozzle materials (Jamwal et al., 2020; Donghua and Dongdong, 2014; Dube et al., 2009). In industrial applications, high wear resistance is a well-defined property for copper matrix composites. Some earlier studies showed that, the property of base material is also the dominant controlling factor in addition to external operational factors as mentioned above i.e. the ambient temperature, test load and shear rate to affect the friction and wear performance of composites (Selvakumar and Vettivel, 2013; Deshpande and Lin, 2006; Tjong and Lau, 2000; Dhokey and Paretkar, 2007). As tungsten does not dissolve in copper i.e. they are immiscible, Cu+W is traditionally considered a composite material. However, the WCu composite prepared by standard powder metallurgy is low in density and its microstructure is generally irregular, resulting in a reduction in high temperature wear

resistance and arc ablation resistance. In addition, severe wear occurs due to sliding contact at high loads and high speeds. In both aluminum alloys and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al alloy composites, the occurrence of severe wear is also affected by normal load, sliding speed, and sliding distance, and is characterized by significant increase in wear rate, large surface wear, and even large-scale material transfer to the counter surface (Deuis et al., 1997; Zou et al., 2020; Childs, 1980).

In order to increase the wear resistance of the wire contact runners or guides used in MIG/MAG torches and consequently to improve the production costs by increasing the service life, the production of pins obtained by sintering of pure Cu and W powders and the in situ wire wear performance were investigated.

## 2. MATERIALS AND METHODS

The chemical composition and mechanical properties of 1.8 mm thick Cu coated commercially produced FEE 340 steel used in the experiments are shown in Table 1. SG2 quality 1 mm welding wire was used as the welding wire and its chemical composition and mechanical properties are also shown Table 1. In situ welding tests were carried out with manifold HB 205 mixed gas i.e. shielding gas. The properties of the shielding gas are given Table 2.

**Table 1.** Chemical properties (% by weight) and mechanical properties of 1.8 mm FEE 340 steel and SG2 quality 1 mm welding wire.

C	Mn	Al	P	S	$\sigma_y$ , MPa	$\sigma_{max}$ ,MPa	% Elongation
0.12	1.5	0.015	0.03	0.03	340	410	23
0.06	1.1	<0.005	0.012	0.011	430	540	28
Ductile-brittle transition temperature (°C): -29, Impact (J): 70							

**Table 2.** HB 205 Standard shielding gas mixture (% by volume).

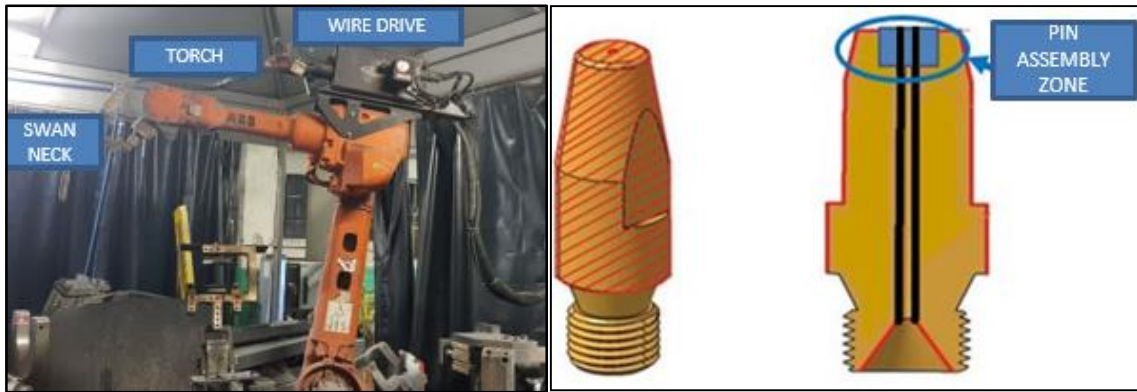
	Argon	Carbondioxide	Oxygen
HB 205	93	5	2

In this study, Fronius Transpuls Synergic 4000 brand gas arc welding machine was integrated to ABB brand robot and used. The chemical composition and mechanical properties of the pin-mounted contact tip are given Table 3.

**Table 3.** Chemical composition (wt%) and mechanical properties of the contact tip.

Cu	Cr	Zr	$\sigma_y$ , MPa	$\sigma_{max}$ , MPa	% Elongation	Hardness-Brinell) (HB30)
Kalan	0,3-1,2	0,03-0,3	10	400	13	130

The performances of a commercially purchased contact tip (Figure 1) with a hole diameter of 1.18 mm and a sintered pin mounted contact tip were compared with the test process ABB brand gas metal arc welding robot (Figure 1).



**Figure 1.** Image of ABB gas metal arc welding robot. ABB arc welding robot contact guide image (hole diameter 1.18 mm).

During the arc welding process, as the wire passes through the hole at the contact tip, the wear resistance decreases with the high heat generated during welding, the diameter of the hole grows and in some cases this hole is closed or becomes completely unusable with spatters. In order to eliminate the above-mentioned reasons, the pin mounting hole with a depth of 5 mm and a diameter of 4 mm was discharged from the end part of the wire contact guide (Figure 1), where the wear was intense, and the pin was produced and then assembled into this hollow tip. On the inside of the contact runner, there is a channel of 1 mm from one end to the other for the passage of the welding wire with a diameter of 1 mm.



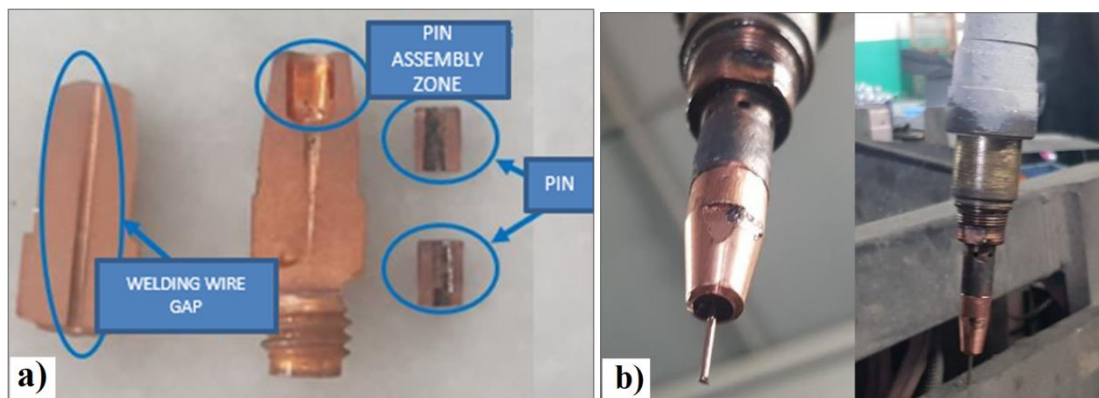
**Figure 2.** Contact guide pin in compression die (Above); image of compressed pin (Left-Below) in contact guide pin (Right-Below). In terms of the way the die is made, a pin passes through its middle and forms the inner hole of the contact tip.

Cu (325 mesh) and W (12 micron) powders were used in the production of the pins used in this study. Ambient conditions were kept the same for all mixtures during powder weighing and compaction processes.

**Table 4.** Mixing ratios of powders used in this study (wt. %)

Specimen Code	W	Cu
CuW5	5	95
CuW10	10	90
CuW15	15	85
Cu	0	100

The powder mixtures were contained in glass tubes at the amounts given in Table 4 and were mixed in the mixing drum for 24 hours in order to mix them homogeneously. In order to prevent the powder mixtures from being affected by the ambient humidity, they were stored in a low humidity environment and in tightly closed containers. The metal+ceramic powder mixture and pure metal powders, which were mixed in the rotating drum for 12 hours, were pressed in a powder compression die (Figure 2 a, b) under 20 tons of load at a feed rate of 2 mm/min. Subsequently, as shown in Figure 2c, a dimensional check was made before the centre pin bar was removed. The pin, which was to be mounted in the contact guide, reached the raw strength and was ready for sintering. Pre sintering compaction ratio of the contact runners/pins at this stage was calculated to be approximately 91% by measuring dimensions, weight and calculating through densities of each component. Electric resistance heat treatment furnace, which can reach a temperature of 1100C, was used for sintering of compressed pins. The contact guide was made ready for the assembly operation by sintering at 720C for 75 minutes under Argon gas (12 lt/min) in the well type sintering furnace. After sintering, the compaction rate increased to 95%. During sintering, free sintering was preferred and samples were placed on the ceramic boat in the heat treatment furnace. A 1.2 mm drill bit was used to guide the pin-mounted contact guides to the gap where the gas metal arc welding wire would pass. After the welding process, the pieces that were tested in the wire erosion device were sliced for microscopic examination (Figure 3a). The final version assembled on the robot welding machine is given in Figure 3b. In situ parameters for testing the produced contact pins: 135 Amps and welding torch travel speed of 2 m/min.



**Figure 3.** a) Close-up image of the general view of the contact guide cut with the wire erosion machine, b) Image of the part with the assembly of the contact guide pin.

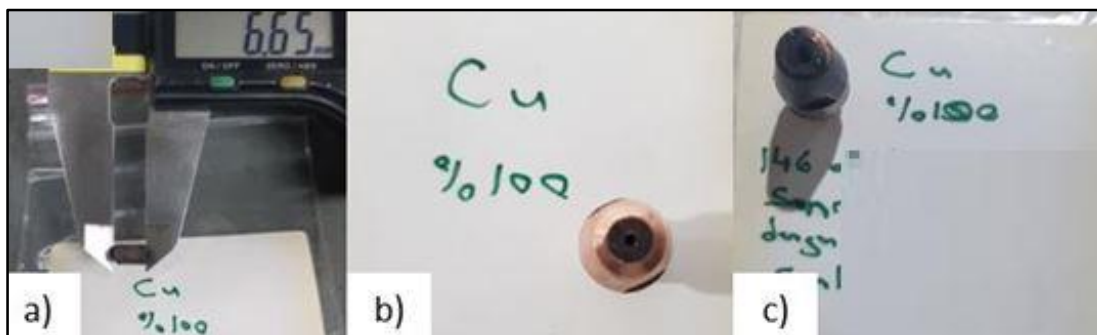
### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The nozzles and contact guides of welding torches, which provide gas flow to the welding area, are more exposed to the thermal effect from the arc and heat up to a temperature of 180-320 °C and above when operated continuously for several minutes without insufficient cooling (Adam et al.,

2001). The resistivity values that increase with increasing temperatures increase the electrical resistance of the wire/surface contact and cause more heating. More importantly, with increasing temperature, the tribo performance of the material is seriously affected, and the wear of the guides that are not cooled enough accelerates. In addition to reducing the guide replacement time, the worn guide makes it difficult to draw the weld seam properly, and it prevents the welding seams from appearing smoothly by making right-left movements of the wire (Adam et al., 2001; Shimizu et al., 2006). In this case, it becomes difficult to visually accept the weld seam.

### 3.1 In-situ Test Results of Pin-mounted Contact Guides

In situ tests of Cu and CuW pins produced by powder metallurgy were made under real production conditions. The performance of the contact guides produced by the commercial forming method and the performance of the parts produced by powder metallurgy were tested at this stage. In Table 5, in situ production numbers of pinless contact guides and contact tips produced by powder metallurgy are shown. The results show that the pin-containing contact tips produced by powder metallurgy outperformed the commercial contact tips. It is a surprisingly good result to achieve with a pin produced with pure Cu powder that does not contain Cr and Zr, with a production difference of only 8%. Since it does not outperform the commercial contact tips production numbers, no further work has been done on it. Although the heat transfer is quite high with the use of pure Cu, it is thought that the very small amount of porosity between the powders reduces the wire/surface contact area and therefore delays the abrasion. In addition, they are subject to very easy deformation and deformation, as long as the wire surface roughness is very good, they do not adversely affect the tribological properties.

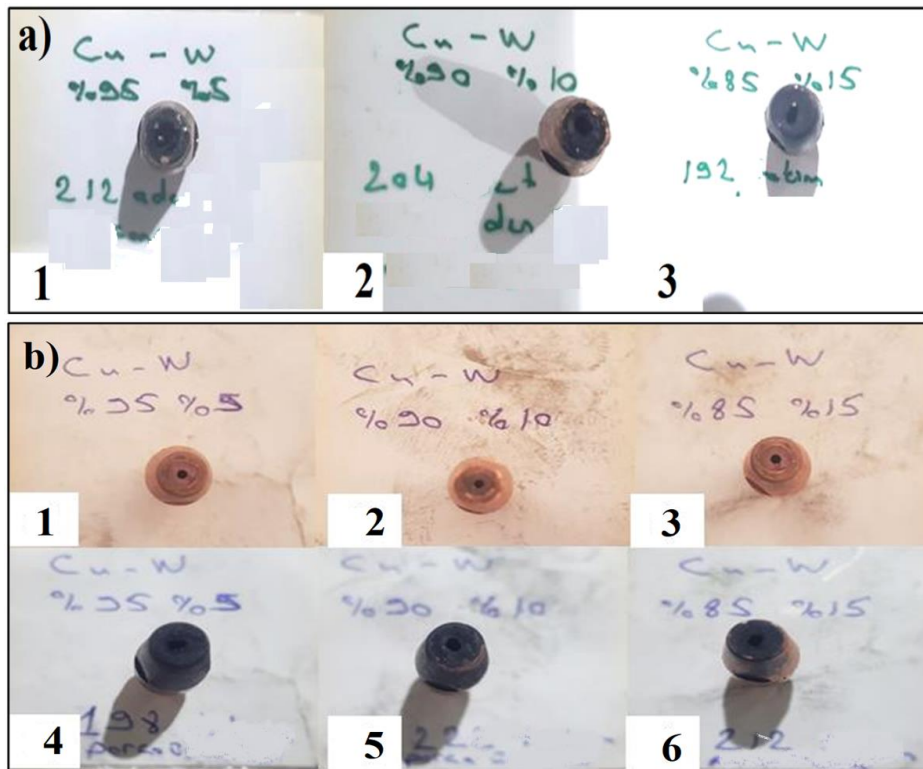


**Figure 4.** a) Cu (100%) sintered pin visual, b) Cu (100%) contact guide visual to be tested in mass production, c) Cu (100%) contact guide visuals with mass production trial.

**Table 5.** Cu contact guide production numbers and difference percentage.

Ratio	Commercial tips	Contact tip with pin	Diff. (%)
Cu (%100)	71732	66284	-8

Tests of the Cu-W series were performed twice to test the repeatability of the observed performance. Among the tests performed, CuW5 and CuW10 samples gave the best results, and these samples were tested for mass production. The mass production test was terminated due to the chassis (short circuit). Except for a general color change, ie blackening, there is no macroscopic damage to the contact runners. Blockage due to build-up damage from spatter is very limited, but wear-related damage is more pronounced.



**Figure 5.** A) 1) CuW5, 2) CuW10 and 3) CuW15 contact guide images with mass production trial. B) 1) CuW5, 2) CuW10, 3) CuW15 before mass production trial, 4) CuW5, 5) CuW10 and 6) CuW15 contact guides visuals with mass production trial.

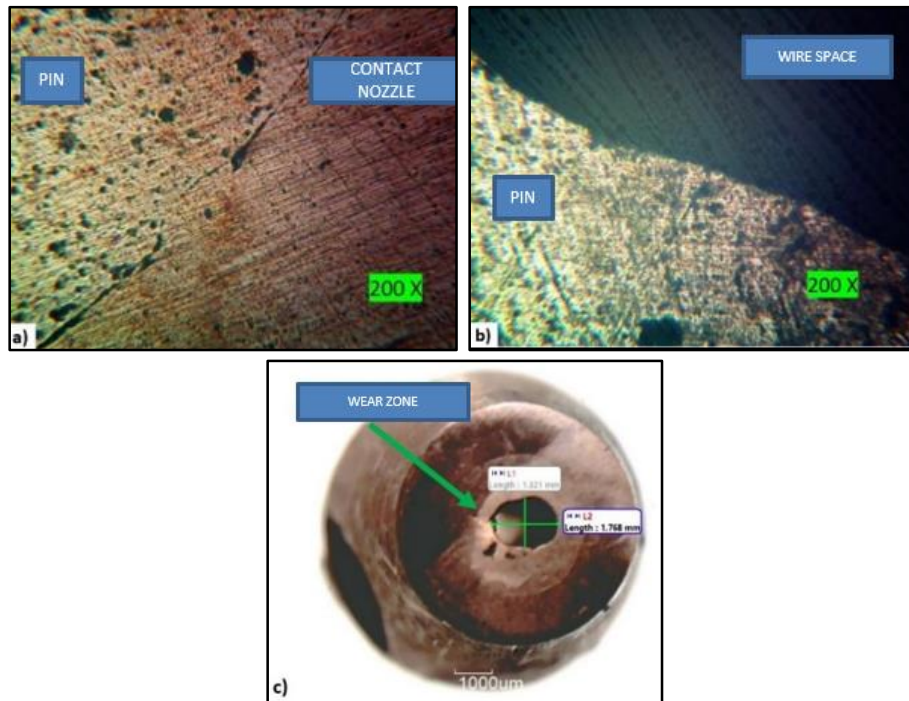
**Table 6.** Cu-W contact guide production numbers (Test 1 and Test 2) and difference in percentage.

Mixture	Commercial	Contact tip with pin (Test 1/2)	Diff. (%)
Cu-W (%95-5)	71732	96248/89892 (-%7)	34/25
Cu-W (%90-10)	71732	92616/100788 (+8%)	29/41
Cu-W (%85-15)	71732	87168/96248 (+%9)	22/34

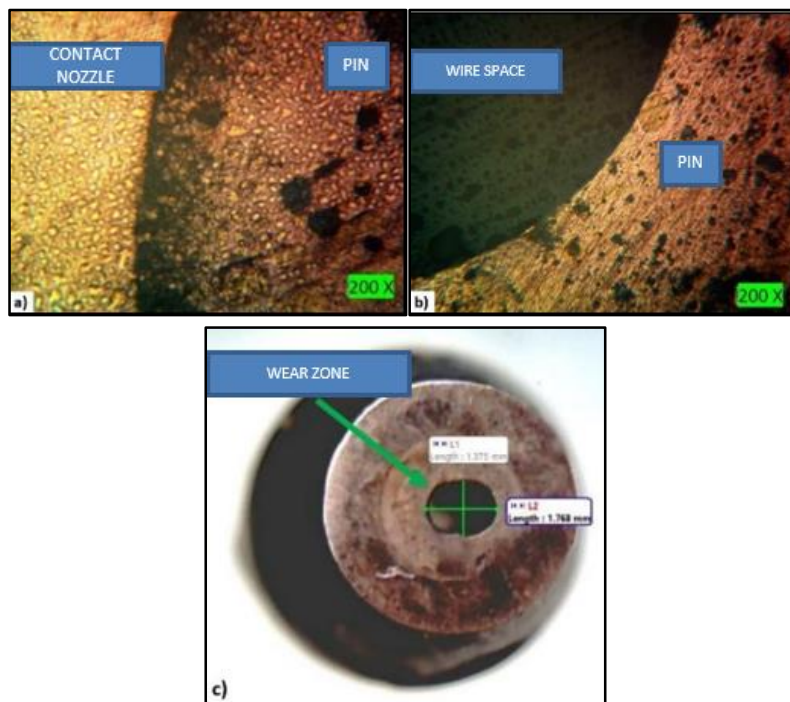
### 3.2 Microscopic Study

Optical pictures of the contact tips in the Cu-W series, which are polished and taken after cutting vertically, are given in Figure 6-8. As seen in Figure 6, 7 and 8 that copper contact tips has blank, featureless microstructure compared to W containing contact pins. Contact pins are also featureless but this is because the both W containing pin and holding contact pins are not etched. Contact pin containing W shows W particles in black spots, mostly homogeneously distributed within the matrix and the number density appears to be increasing as the W powder additives are increasing in percentage. The interparticle distance in general may be an effective measuring comparison for the evaluation of results, that is, with CuW15 the interparticle distance is obviously lower and higher with CuW5. CuW10 may have optimum distance as comparison to CuW15 and CuW5 specimens. During the test process or during the cutting phase, it is observed that the W powders are displaced and gaps appearing as porosity are formed. So, it is seen that the number of black gaps in the contact runners given in Figures 7 and 8 has decreased. The low wear resistance of some CuW pins exposed to high temperatures is explained by the lower high temperature wear resistance and arc ablation resistance of CuW composites produced with standard powder metallurgy, resulting in different wear resistances (Zou et al., 2020). As seen in Figure 6a, it has been determined that the contact tips were welded to the main terminal body, and it is thought that the pin tips, which reach very high

temperatures during the test phase, will be joined in this way both due to the high current effect and also due to the high ambient temperature. Hole widths show the amount of wear. It is seen that the cross-sectional ratios (AR) of the hole sizes are 1.33, 1.28 and 1.44 mm, respectively, taking into account the CuW15, CuW10 and CuW5 samples. In this case, it is seen that the CuW5 sample is exposed to the most wear. However, the least change or the least proportional deviation was seen in the 90/10 sample.

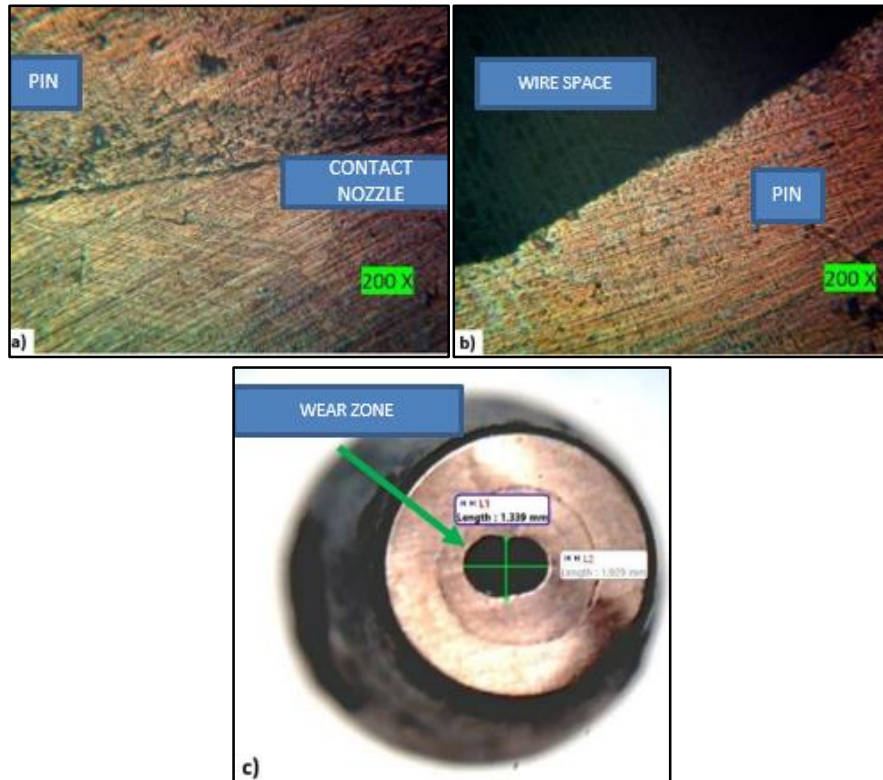


**Figure 6.** a) CuW15 microstructure image, b) pin and wire drive cavity 200x magnification, c) CuW15 close-up image (hole dimensions 1.768mm x 1.321mm AR:1.33).



**Figure 7.** a) CuW10 microstructure image, b) Contact guide (pin) and wire feed hole 200x magnification, tested in mass production, c) CuW10 close-up image (Hole dimensions 1.768mm x 1.375mm, AR:1.28)





**Figure 8.** a) CuW5 microstructure image, b) Contact guide (pin) and wire feed hole 200x magnification, c) CuW5 close-up image (hole dimensions 1.929mm x 1.339mm, AR: 1.44).

Wear analysis of the cross-sections of the contact guide pins is given in Figure 9. From the sections, it was observed that the inner part of the CuW sinters at CuW15 and CuW5 ratios were covered with oxide, but at CuW10 ratios, the sintered pin was not oxidized or oxidized very little. Another important criterion is the hole expansion rates. This ratio will give information about the amount of wear and therefore about the wear resistance. While CuW15 sample was exposed to 35.4% expansion, CuW10 sample showed 11.5% expansion. Since the CuW5 sample expanded by 31.5%, the best ranking in terms of abrasion resistance is CuW10, CuW5 and CuW15.

### 3.3 SEM Results

The wear surface pictures of Cu, CuW15, CuW10 and CuW5 series, which were tested in situ, are given in Figure 10. The wear characteristics of the pure Cu sample and CuW5, CuW10 and CuW15 samples given in Figure 10a differ. While the pure Cu wear in Figure 10a contains very deep wear marks, the CuW5 in Figure 10b and CuW10 in Figure 10c are sufficiently superficial. The other non-superficial wear trace was seen on the CuW15 sample. Although it is not expected that the wear marks are deep or have a fragmented appearance, it can be explained by the exposure of the matrix to arc heat, not sintering at high enough temperatures, insufficient sintering time or high additive ratio. It is thought that the increase in wear with the increase in the additive ratio, the increase in the amount of W powder in the electrical resistance and the increase in the temperature with the joule effect, and the subsequent softening of the wire contact surface, may cause both the W powders to break off and the formation of porosity and the deepening of the wear marks. It has been observed that similar excessive wear traces are very few or absent in CuW10 and CuW5 samples formed by sintering copper and W powder additive. As seen in Figure 10, the fact that the wear is linear and superficial is due to the welding wire going as close to the surface as possible and the matrix being soft. Particularly, it is observed that the wear and also the convection heat from the welding arc

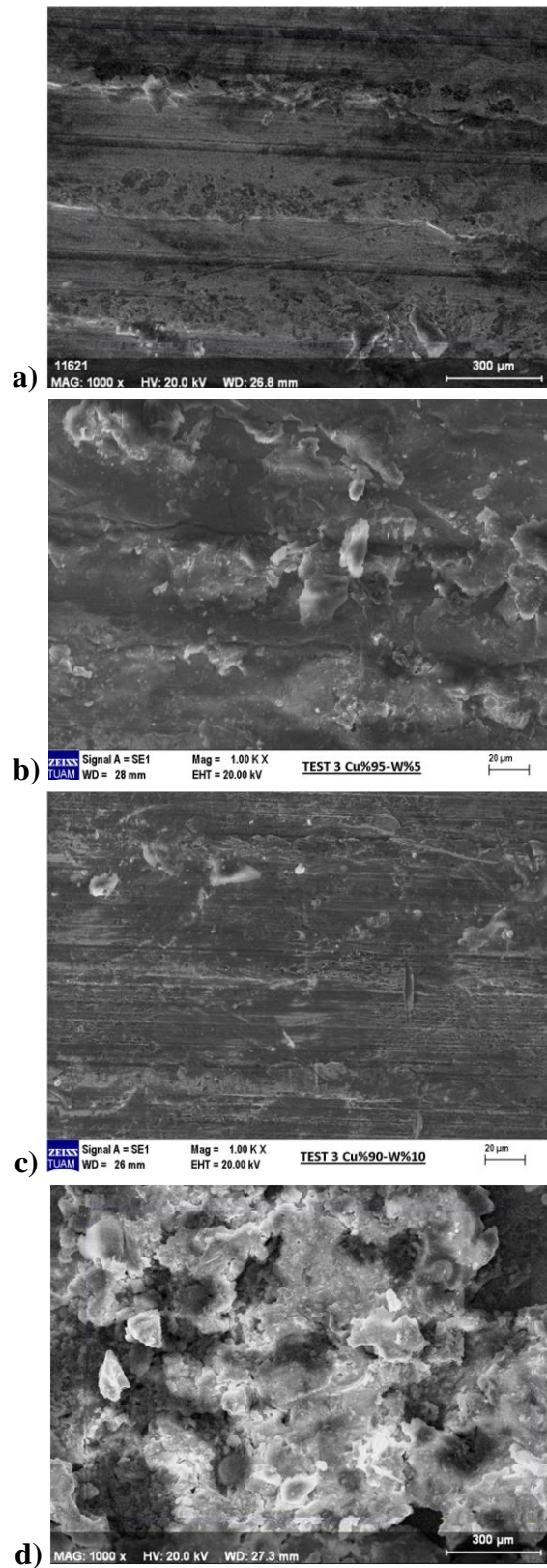
increases the temperature at the tip, where it is quite high, and in this case, the active gas, CO<sub>2</sub>, reacts actively in this region, under high heat energy in the arc column created by the arc plasma, and a part of the O<sub>2</sub> in the gas mixture.



**Figure 9.** Close-up image of the cross-section of the contact guide (pin) a)CuW15, b)CuW10 and c)CuW5) tested in mass production.

(Lancaster, 1984) should be expected to form oxides. Intermittent initiation of the protective gas flow during each new weld seam initiation of the continuous gas flow may cause sudden oxidation and nitriding of the contact runners in contact with the ambient air. In addition, the presence of oxygen in the gas mixture used and the effect of high temperature show that oxide formation is possible in the same way. It should be noted that thermally induced material softening inhibits mechanical mixing of wear particles, although material transfer and retransfer processes occur in the severe wear regime. When the main wear mechanism is scraping material adhesion, contamination, and delamination, as the mechanism suggested in the above section, the parts exposed to cyclic loads between the sliding surfaces may become trapped in the matrix or matrix particle interface due to fatigue. The fact that W particles in Cu matrix are not exposed to deformation or are exposed to very little due to their

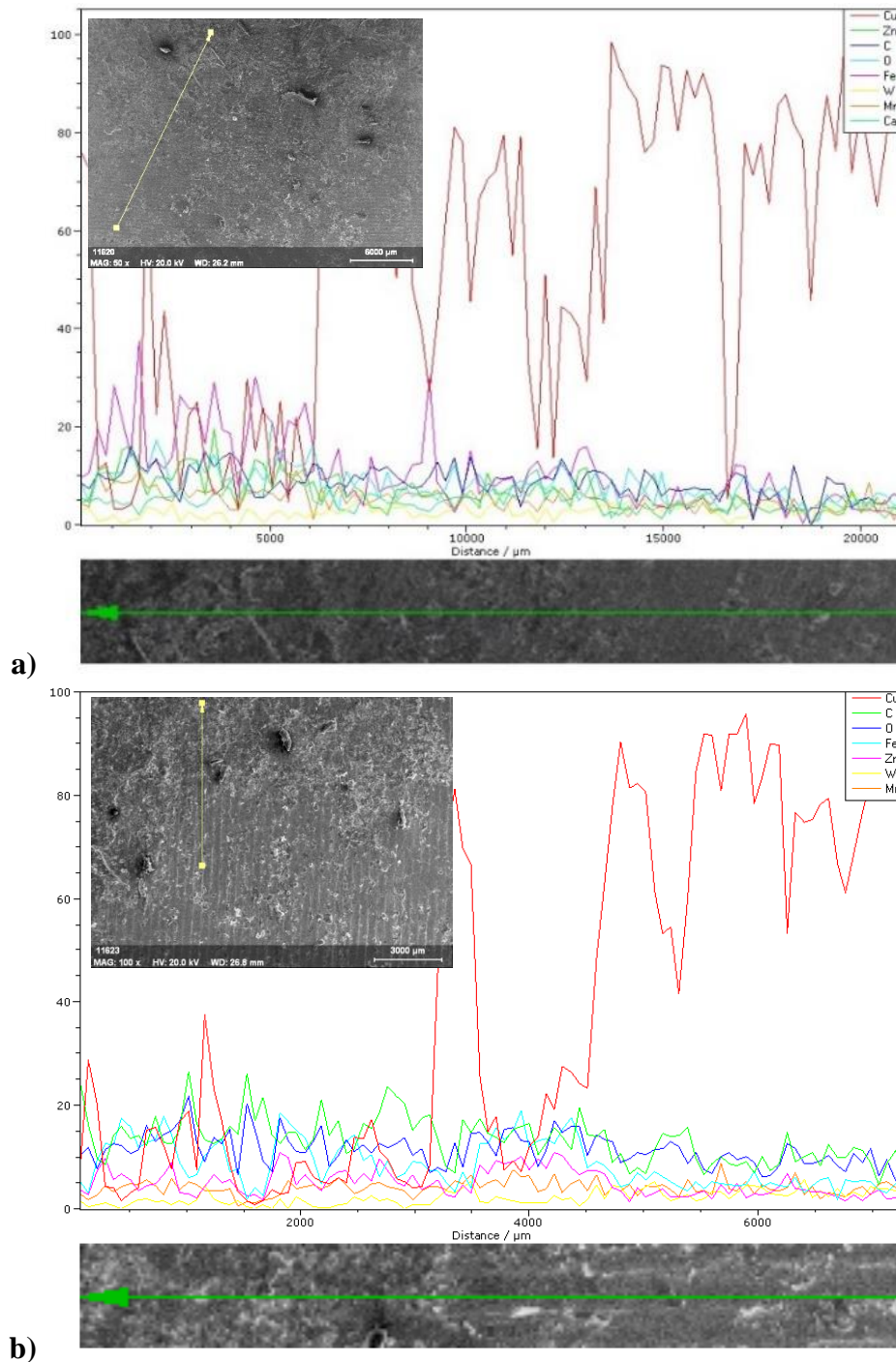
hardness compared to Cu matrix, and the interfacial bond strength with Cu is low (Ma et al., 2018; Chen et al., 2016) causes W powders to break off from the matrix and cause abrasion or scraping.



**Figure 10.** SEM wear trace images from Cu, CuW5, CuW10 and CuW15 specimens

As can be seen in Figure 11, as a result of the line analysis taken from the regions where wear occurs and where it does not occur, the amount of Cu in the uneroded region is higher. It is thought

that the sinter surface is rich in Cu before the wear occurs, a homogeneous layer is formed by the combination of Cu powders on the surface during heat treatment, or it is enriched in Cu by plastering the softer Cu powders on the surface during pressing. The reduction of Cu in the worn parts (Figure 11a and b) causes oxidation and removal from the environment with the effect of corrosion, either by the abrasion of the surface of the welding wire or by the convection of Cu or by the effect of high temperature and the oxygen in the mixed gas.



**Figure 11.** SEM and EDX analyzes of the wear surfaces of Cu10W and Cu5W samples

Regarding the softening of the surface and sub-surface areas close to the wire and matrix contact surface during the movement of the welding wire at the contact tips, arc instability may occur during sliding because the welding wire receives the electric current from different points under the

continuous friction effect of the abrasive. When surface materials adhere to the opposing surface and show plastic deformation in the shear direction, microcracking may start at some weak bonding sites, particularly the particle-Cu interface. The softened material under shear and compressive stress is then pushed forward by the abrasive to form a thick shear layer. As subsurface deformation continues, cracks coalesce and grow, forming an interface between the abrasive material and the substrate at a given depth. As the tip of the subsurface crack approaches the contact surface, some layer of surface material is broken off and separated from the substrate, i.e. the matrix. Figures 10 and 11 show the condition of Cu-W sinter material after testing and the wear process of these composites.

#### **4. CONCLUSIONS**

The pins prepared with powder metallurgy containing Cu and 5%, 10% and 15% W were mounted on the MIG/MAG contact tips, and the following results were obtained as a result of the in situ production tests of the contact tips produced in this way:

1. According to test results, the wear trace appearances showed that the samples with the lowest (% 5) and the highest amount (%15) of additives experienced more wear than that of CuW10 sample due to the high amount of particle which reduces the interparticle distance.

2. The wire wear traces also show negative change at the contact tips according to the amount of additive, i.e. 5% and 15% W additions are poor in resistance in wire erosion.

3. Short-circuit damage was observed after 89892 mm long arc welding for CuW5 and 100788 mm for CuW10. This indicates that CuW10 sample is more resistant to wear damage due to better number of particles i.e. optimum interparticle distance.

4. For CuW15 sample, the test was terminated due to the wear on the tip after the 96248 mm long welding, and the targeted numbers were also reached. However, the length of weld is still high with CuW10 specimens.

5. When the wear traces are compared, Cu, CuW5 and CuW15 specimens appears to have suffered from deeper and wider form of wear whereas, the traces of CuW10 specimens spears to be shallow and less distorted due to the presence of optimum amount of W particles.

#### **5. ACKNOWLEDGEMENTS**

This study was supported by Şahinkul Makina Scientific Research Projects Coordination Unit with Project number of ARGE-2020-018\_2000930000.

#### **6. CONFLICT OF INTEREST**

Author(s) approve that to the best of their knowledge, there is not any conflict of interest or common interest with an institution/organization or a person that may affect the review process of the paper.

## 7. AUTHOR CONTRIBUTION

Mustafa YAZAR has carried out experiments, collected experimental data and analyzed them. Şükrü TALAŞ has designed the research process and interpreted results.

## 8. REFERENCES

- Adam G., Sievert T.A., Quinn T., Vigliotti P., Contact Tube Temperature during GMAW, *Welding Journal*, 37-41, 2001.
- Chen P., Shen Q., Luo G., Wang C., Li M., Zhang L., Li X., Zhu B., Effect of Interface Modification by Cu Coating W Powders on the Microstructure Evolution and Properties Improvement for Cu-W Composites, *Surface and Coatings Technology* 288, 8-14, 2016.
- Childs T.H.C., The Sliding Wear Mechanisms of Metals, Mainly Steels, *Tribology International* 13(6), 285-293, 1980.
- Deshpande P.K., Lin R.Y., Wear Resistance of WC Particle Reinforced Copper Matrix Composites and the Effect of Porosity, *Materials Science and Engineering: A* 418(1-2), 137-145, 2006.
- Deuis R.L., Subramanian C., Yellup J.M., Dry Sliding Wear of Aluminium Composites – A Review, *Composite Science Technology* 57(4), 415-435, 1997.
- Dhokey N.B., Paretkar R.K., Study of Wear Mechanisms in Copper-Based SiCp (20% by volume) Reinforced Composite, *Wear* 265(1–2), 117-133, 2008.
- Donghua D., Dongdong G., Thermal Behavior and Densification Mechanism during Selective Laser Melting of Copper Matrix Composites: Simulation and Experiments, *Materials & Design* 55, 482-491, 2014.
- Dube R.K., Maji P., Bikramjit B., Enhancement of Wear Resistance Of Copper with Tungsten Addition (less than 20 wt. %) By Powder Metallurgy Route, *Journal of Tribology* 131(4), 1-9, 2009.
- Durgutlu, A. and Gülenç, B., The Effect of Welding Speed on the Microstructure and Penetration in Arc Welding, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 23(4): 251-260, 1999.
- Ezer M., Cam G., A Study on Microstructure and Mechanical Performance of Gas Metal Arc Welded AISI 304L Joints, *Material Science and Engineering Technology* 53(9): 1043-1052, 2022.
- Gautam R.K., Ray S., Jain S.C., Sharma S.C., Tribological Behavior of Cu–Cr–SiC<sub>p</sub> in-situ Composite, *Wear* 265(5-6), 902-912, 2008.
- Jamwal A., Mittal P., Agrawal R., Gupta S., Kumar D., Sadasivuni K.K., Gupta P., Towards Sustainable Copper Matrix Composites: Manufacturing Routes with Structural, Mechanical, Electrical and Corrosion Behaviour, *Journal of Composite Materials* 54(19), 2635-2649, 2020.
- Kou S., *Welding Metallurgy*, Wiley International, Second Edition, 2002.
- Lancaster J.F., *The Physics of Welding*, Pergamon Press, Second Edition, Oxford, pp. 204–234, 1986.
- Ma G.C., Fan J.L., Gong H.R., Mechanical Behavior of Cu-W Interface Systems Upoon Tensile Loading from Molecular Dynamics Simulations, *Computational Materials Science* 152, 165-168, 2018.
- Selvakumar N., Vettivel S.C., Thermal, Electrical and Wear Behavior of Sintered Cu–W Nanocomposite, *Materials and Design* 46, 16-25, 2013.
- Serindag H.T., Cam G., Multi-pass butt welding of thick AISI 316L plates by gas tungsten arc welding: Microstructural and mechanical characterization, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 200, 104842, 2022.

- Serindag H.T., Tardu C., Kircicek I.O, Cam G., A study on microstructural and mechanical properties of gas tungsten arc welded thick cryogenic 9% Ni alloy steel butt joint, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 37, 1-10, 2022.
- Shimizu H., Yokota Y., Mizuno M., Kurokawa T., Wear Mechanism in Contact Tube, *Science and Technology of Welding and Joining* 11(1), 94-105, 2006.
- Singla M., Singh L., Chawla V., Study of Wear Properties of Al–SiC Composites, *Journal of Minerals Materials Characterization and Engineering* 8(10), 813-819, 2009.
- Tjong S.C., Lau K.C., Abrasive Wear Behaviour of TiB<sub>2</sub> Particle Reinforced Copper Matrix Composites, *Materials Science and Engineering: A* 282(1-2), 183-186, 2000.
- Yazar M., Kul M., Alp A.K., Talaş Ş., The use of NiAl Coating Deposited by ESD against the Wear of Sliding Wire in GMAW Contact Tips, *Journal of Polytechnic* 25(2), 739-744, 2022.
- Zhang L., He X.B., Qu X.H., Duan B.H., Lu X., Qin M.L., Dry Sliding Wear Properties of High Volume Fraction SiCp/Cu Composites Produced by Pressure Less Infiltration, *Wear* 265 (11-12), 1848-1856, 2008.
- Zou J., Song D., Shi H., Liang S., Effects of Grading Tungsten Powders on Properties of CuW Alloy, *Materials Research Express* 7(2): 026528, 2020.

---

Araştırma Makalesi / Research Article

---

**The Investigation of Production Parameters and Their Effect on the Tribomechanical Properties of the Compression Molded Polymeric Bearing Materials**

Esad KAYA

Eskişehir Osmangazi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, Eskişehir,  
Turkey

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-7332-6154>, esatkaya@ogu.edu.tr

**Geliş/ Received:** 08.11.2022;

**Kabul / Accepted:** 21.12.2022

**ABSTRACT:** UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene) is a widely used polymer due to its superior mechanical properties. The microstructural, mechanical, and tribological properties of this polymer material produced by the compression molding technique significantly depend on the production parameters. The different molding pressures and temperatures dramatically impact the properties of the material. In this study, UHMWPE polymer samples were produced at three different molding pressures (150 Bar, 250 Bar, and 350 Bar) and molding temperatures (120°C, 150°C, and 180°C) using the compression molding technique. The microstructural, mechanical, and tribological properties of the samples were examined. It is observed that low-temperature molding production parameters cause an increase in strength. On the other hand, this situation enables decreased ductility. It has been determined that as the molding temperatures increase, ductility increase in all the same molding pressure groups. Similarly, it was observed that increasing the molding pressure in the same temperature group increased the strength of the material. It has been determined that there is an optimum molding pressure and temperature for wear resistance. It has been observed that the coefficient of friction (COF) behavior is not much affected by the molding parameters. Agglomeration of polymer particles is envisaged as the main reason for forming optimum pressure and temperature conditions in wear resistance. Agglomerated particles in the microstructure reduce bonding strength and deteriorate wear resistance. The study determined the optimum molding pressure (250 Bar) and temperature (150°C) for the production of UHMWPE material by a compression molding technique.

**Keywords:** UHMWPE, Compression molding, Tribology.

---

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: esatkaya@ogu.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Kaya, E., (2023). The Investigation of Production Parameters and Their Effect on the Tribomechanical Properties of the Compression Molded Polymeric Bearing Materials. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 38-49.



## 1. INTRODUCTION

A significant number of mechanical components are made of polymer materials in engineering applications (Ginzburg et al., 2006; Sarı and Salman, 2016). Polymers cover a primary technological sector due to their simple forming capabilities and economical production methods (Feyzullahoglu and Saffak, 2008; Kumar et al., 2017). Engineering polymers, in particular, are utilized due to their superior mechanical and tribological qualities in the automotive and aviation industries (Dearn et al., 2013; Ginzburg et al., 2006; Rymuza, 2013). These advanced polymers are frequently used in friction applications (Panin et al., 2015). They are a perfect substitute for many materials because of their superior wear resistance, low lubrication requirement, lightweight, and affordable price (Koç, 2011; Sarı and Salman, 2016). Bearings and bearing mechanisms are among the areas that utilize the most frequent candidate for metallic materials (Ginzburg et al., 2006). Due to their low density and superior wear resistance, and low friction characteristics, polymeric bearings can function without lubrication (Dearn et al., 2013). The main reason for the superior tribological performance of polymer materials is the monomolecular films that form at the contact surfaces (Bahadur, 2000; Hüseyin and Yetgin, 2010). These films, which develop between contacting bodies, have cohesive bonds that are more powerful than adhesive bonds (Bahadur, 2000; Jintang, 2000). Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) is one of the most widely used polymer materials for bearing parts. UHMWPE is a type of polymer formed due to the bonding of 4 to 6 million molecules (Gürgen, 2019; Uzuner and Gediktaş, 2010). Compared to other polymers, UHMWPE has a high impact on toughness (Hüseyin and Yetgin, 2010). They produce a transfer film more rapidly than other polymers due to their high molecular density (Rymuza, 2013). UHMWPE is widely used in engineering applications due to its low friction behavior and superior wear resistance (Tong et al., 2003).

UHMWPE has been examined in several research articles since it is utilized to produce rolling bearing parts (Hüseyin and Yetgin, 2010; Panin et al., 2015; Uzuner and Gediktaş, 2010). The wear rate and COF behavior of the polymers under various speeds and loads were examined in the researches. UHMWPE material can be employed in applications requiring a superior wear resistance and COF, based on the literature research (Hüseyin and Yetgin, 2010; Sarı and Salman, 2016; Uzuner and Gediktaş, 2010). Studies on the tribological performance of polymers are very complex compared to metallic materials. The main reason is that the formed transfer film layer depends on the shear rate, pressure, surface roughness, and temperature (Wu et al., 2002). When the literature is examined, it is seen that the tribological performance of UHMWPE has been investigated superficially. The wear and friction behavior of cast UHMWPE material under dry conditions were investigated. As a result of the researches, it was determined that the COF decreases with increasing load and increases with increasing sliding speed (Hüseyin and Yetgin, 2010; Sarı and Salman, 2016). The tribological performance of twelve different polymeric materials was investigated concerning sliding distance and surface pressure (Uzuner and Gediktaş, 2010). The COF increased with increasing sliding speeds and decreased at high surface pressures. It was also observed that UHMWPE exhibits superior wear resistance in all groups. Another study investigated the effect of the contact of UHMWPE and polished steel on the tribological and microstructural properties. It was found that while the COF decreases with the shear rate at low pressures, it decreases much more at high pressures. This situation was explained by the fact that the lamellar structure of the UHMWPE material in the crystalline region remained parallel throughout the movement at low pressures (Klapperich et al., 1999).

When the studies are examined, the tribological performance of the UHMWPE material varies significantly due to the sliding speed, contact pressure, surface roughness, temperature, and environmental conditions. This observed fluctuation is thought to be due to uncertainty in the production conditions. In this study, UHMWPE samples were produced at three different molding pressures and temperatures. The microstructural, mechanical, and tribological properties of UHMWPE specimens were analysed by tests. The production parameters have been optimized.

## 2. MATERIALS AND METHODS

In the study, UHMWPE (43951, Alfa Aesar) was used as the rolling bearing material. The thermophysical properties of the material used in the experimental studies are shown in Table 1. 2 grams of UHMWPE powder was used in the compression molding technique. The molding process was performed for 5 minutes (3 minutes of heating and 2 minutes of cooling cycles).

**Table 1.** Thermophysical properties of UHMWPE powder material used in the experimental studies

<b>Material Name</b>	<b>UHMWPE</b>
<b>Formula</b>	(CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub>
<b>Melting Point</b>	150°C
<b>Autoignition Temperature</b>	343°C
<b>Molecular Weight</b>	3-6 million
<b>Average Particle Size</b>	150 μm
<b>Density</b>	0.945 g/cm <sup>3</sup>

The samples were produced at three different pressures, 150 Bar, 250 Bar, and 350 Bar, and three different temperatures, 120°C, 150°C, and 180°C, respectively. The production algorithm used in the experimental studies is shown in Table 2. Struers CitoPress-1 hot mounting press device was used to produce the samples.

**Table 2.** Sample production plan used in the experimental studies

<b>Sample Code</b>	<b>Molding Pressure (Bar)</b>	<b>Molding Temperature (°C)</b>
<b>1</b>		120
<b>2</b>	150	150
<b>3</b>		180
<b>4</b>		120
<b>5</b>	250	150
<b>6</b>		180
<b>7</b>		120
<b>8</b>	350	150
<b>9</b>		180

The microstructural analysis of the produced samples was performed under Nikon Clemex optical microscope. The microhardness of the samples was measured using a Future Tech FM-800 device at a load of 100gf and a dwelling time of 20 seconds. The mean hardness for each control group was calculated using the average of three hardness tests. The standard deviation was used as an error function to minimize uncertainty. Having completed optical microscopy and hardness analysis, wear tests were applied to the samples using the CSM tribometer. The tests were carried out in ball-on-disc type according to ASTM G-99 norm. A Ø3 mm diameter ball (containing 90% WC and 10%Co) was used as an abrasive counter body. The counter body ball has a hardness of 91.6

HRA. The wear test was performed in a rotating projectile with a 4 mm radius, a load of 10N, and 470 RPM (20 cm/s linear speed), 500 meters wear distance. The instantaneous data collection rate of the wear test was chosen as 10 Hz. The surface depth and width of the wear tracks formed after the tests and the average surface profile of the samples immediately after production were carried out using the Mitutoyo SJ-400 surface profilometer. Average surface profiles were obtained as  $R_a$ ,  $R_z$ , and  $R_q$  for 2,4 mm. Both average and worn surface profile scanning was performed in accordance with the ISO R97 norm. Raw data were processed using Gaussian Filtering Technique. Two profile measurements were performed for each worn surface, and the average cross-sectional area was used in the specific wear rate calculations. The measured maximum cross-sections are also exhibited as a Figure in the study. In addition, the mean COF values of the samples were recorded and reported during the experiments.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 Microstructural Analysis

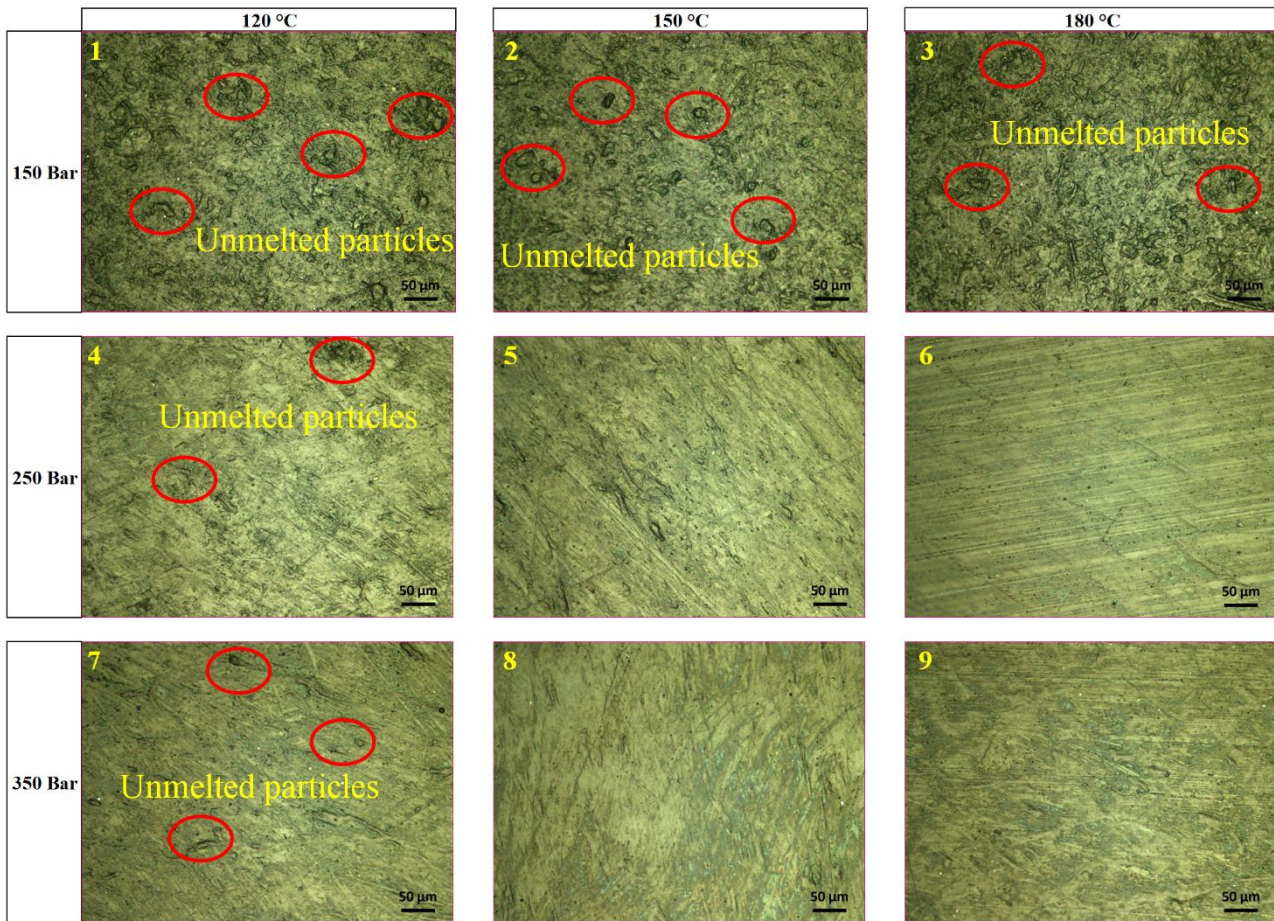
Figure 1 shows macro structure photographs of the produced samples, UHMWPE powder and hot molding device used in the experiments. When the photograph is examined, it shows that the powder polymer material is lighter in color than the molded samples. Similarly, it is seen that the samples produced at low temperatures are lighter in color than the samples produced at high temperatures. It is known that this situation is due to higher crystallinity in polymer powder and samples pressed at low temperatures (Wu et al., 2002). When the samples are examined in general, it can be said that the light-colored samples contain more non-melting particles and voids. In addition, as the molding temperature increases, the edges of the specimens turns from light colour to darker colour. This incident shows that increasing the molding temperature improves the microstructure crystallinity (Gürgen, 2019).



**Figure 1.** Macrostructure photographs of the produced samples, UHMWPE powder, and hot molding device used in experiments

Figure 2 shows a comparative optical microstructure photo of the produced samples. As seen from the optical microstructure analyses, solidification was detected in the samples without complete dissolution at all temperatures at 150 Bar molding pressure (Samples 1, 2, and 3). This situation is related to the fact that the applied pressure cannot sufficiently bond the molten UHMWPE powder even though the temperature increases. These molten regions prevent the complete homogenization of the microstructure. In the productions carried out with 250 Bar molding pressure, it is observed that the partially molten regions have decreased but still exist in the microstructures (Samples 4, 5,

and 6). In the production at 350 Bar molding pressure, it is seen that these formations completely melt together with the increasing pressure and provide complete unity (Samples 7, 8, and 9). When the microstructure of samples 7, 8, and 9 are examined, which has the highest production pressure, it was seen that the microstructure was homogeneous, and the molten parts were eliminated.



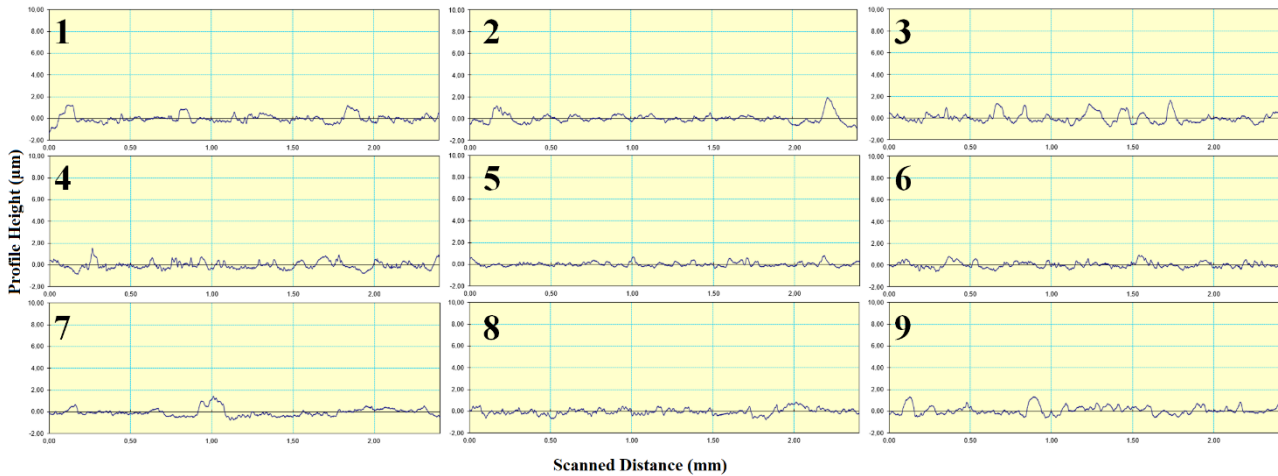
**Figure 2.** Optical microstructure image of the produced samples

### 3.2 Surface Roughness Analysis

Table 1 and Figure 3 show the average surface roughness values and morphology of the surfaces of the produced samples, respectively. When the results are examined, it is observed that the sample with the highest average surface roughness value is sample 1, which belongs to the low molding pressure and temperature. When these sample surfaces are examined, which have the highest average surface roughness, discontinuities formed by semi-molten forms are observed. This production defect is also observable in the optical microstructure photograph of the samples. Generally, the highest differences between peak and depths ( $R_z$ ) are measured in the samples produced with the 120°C molding temperature. Since the heat given in the samples in this group is lower than the melting temperature of the UHMWPE material, it is not sufficient to melt it completely (Ge et al., 2003; Gürgeç, 2019; Xiong and Ge, 2001).

**Table 3.** Average surface roughness values of the produced samples

Sample Code	R <sub>a</sub> (μm)	R <sub>z</sub> (μm)	R <sub>q</sub> (μm)
1	0.28	2.0	0.38
2	0.28	1.9	0.38
3	0.34	2.1	0.44
4	0.28	1.8	0.35
5	0.15	1.1	0.20
6	0.22	1.3	0.27
7	0.28	1.5	0.34
8	0.22	1.6	0.29
9	0.24	1.6	0.31

**Figure 3.** Average surface profiles of the produced samples

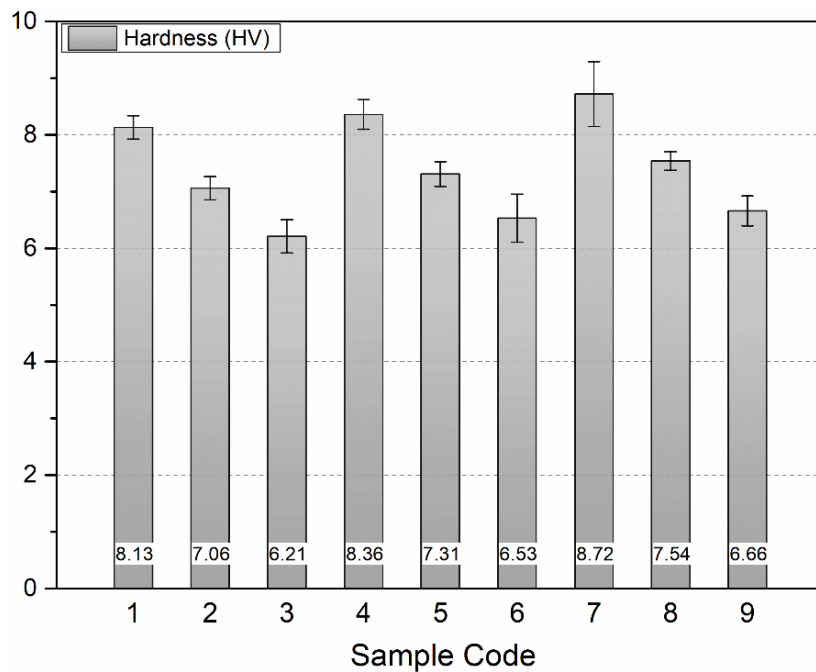
### 3.3 Hardness Analysis

Table 2 and Figure 4 show the average microhardness values of the produced samples. The analyzes are shown on the Vickers microhardness scale. As can be seen from the analyzes made, the molding pressure has a direct effect on the hardness of the UHMWPE material. It is seen that the hardness of the material increases with the increase of the molding pressure at the same molding temperature. This incident is thought to be the reason for the high temperature and high-pressure related bonding between the particles. As can be seen, the hardness alteration is not significant between 150-350 Bar. This situation proves that the 150-350 Bar molding pressure shows a regular alteration. Different studies also found similar results (Gürgen, 2019; Wang and Ge, 2007).

In contrast to the molding pressure, there appears to be a systematic alteration in the molding temperature. When the results are examined, it is seen that the hardness decreases with increasing molding temperature. It is known that as the molding temperature increases, the polymer material's crystallinity decreases. With the recrystallization process after melting under high temperatures, the degree of crystallinity decreases compared to the polymerized powder UHMWPE material. A high degree of crystallinity can dramatically improve mechanical properties. Therefore, changes in molding temperature directly affect the polymer material's mechanical properties (Kanaga et al., 2008; Oral et al., 2010). Therefore, one can infer that the polymers produced at high molding temperatures exhibit more ductile plastic deformation.

**Table 4.** The average microhardness data of the produced samples

Sample Code	Groups		Measurements (HV)			Mean Hardness (HV)
			1	2	3	
1	150 Bar	120°C	9.60	8.10	6.70	8.13
2		150°C	7.30	7.10	6.80	7.07
3		180°C	6.60	6.10	5.90	6.20
4	250 Bar	120°C	8.50	8.00	8.60	8.37
5		150°C	7.20	7.10	7.60	7.30
6		180°C	6.20	6.20	7.10	6.50
7	350 Bar	120°C	9.40	8.70	8.00	8.70
8		150°C	7.50	7.30	7.70	7.50
9		180°C	6.80	6.30	6.90	6.67

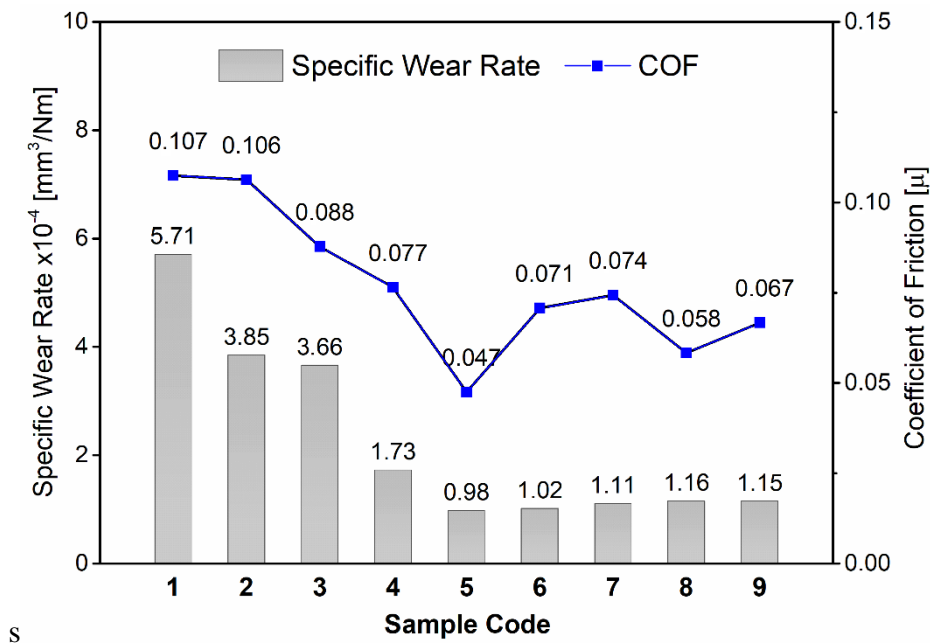
**Figure 4.** Average microhardness values of the produced samples

### 3.4 Wear Test

Table 3 and Figure 5 show the mean COF and wear rate values of the samples. The highest wear rate was observed in the 150 Bar molding pressure group. This group also has the lowest molding pressure. When the wear rates of the samples produced at different molding temperatures at a constant molding pressure are examined, it is seen that the wear resistance is lower at 120°C molding temperature, which is also the lowest molding temperature. It is seen that wear resistance increases in productions carried out at 150°C and 180°C. When the mean COF values are examined, the highest mean COF values are seen in samples 1, 2, and 3. These samples produced at the lowest molding pressure (150 Bar) exhibited the highest friction behavior.

**Table 5.** The mean COF and wear rates of the produced samples

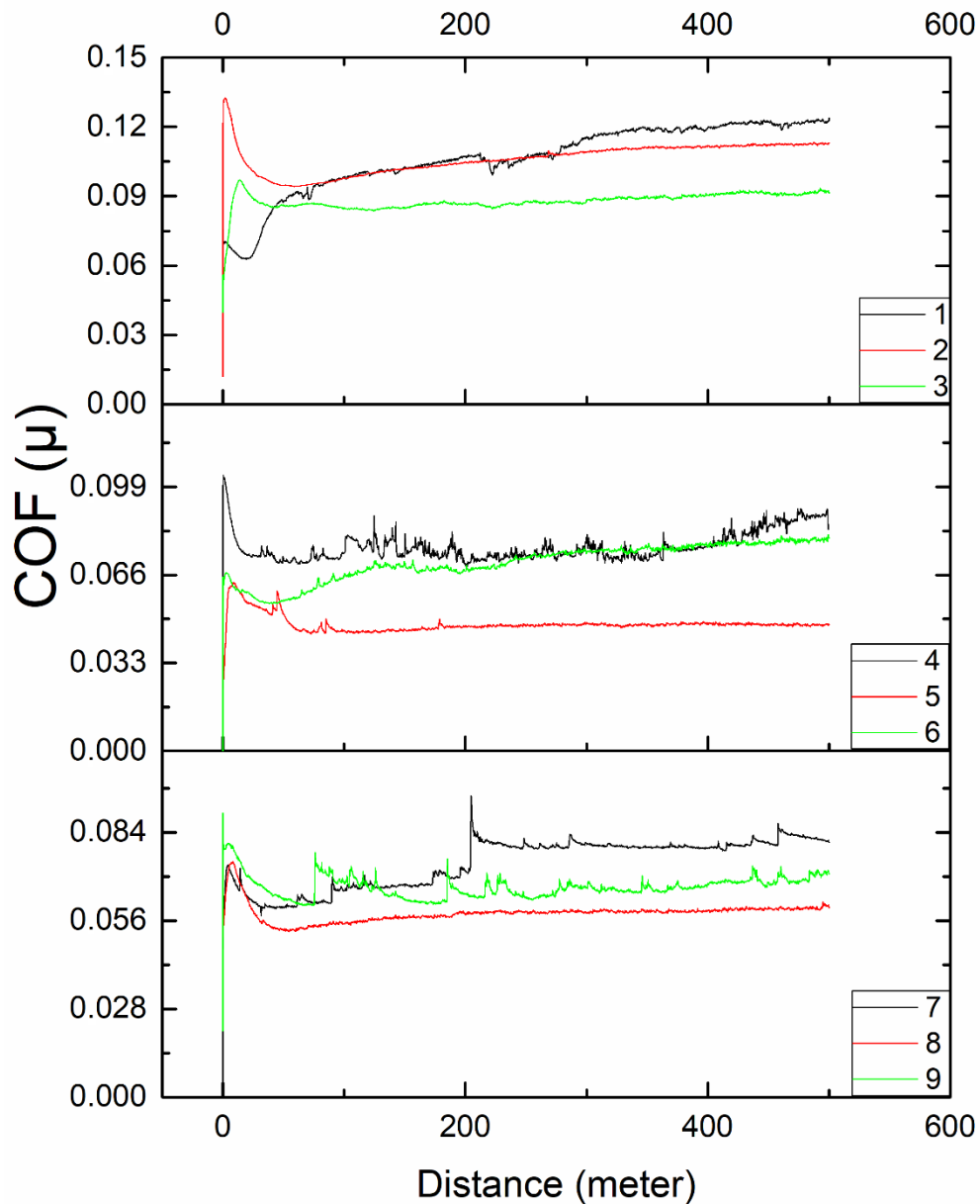
Sample Code	Area Measurements		Mean area (mm <sup>2</sup> )	Wear Rate (10 <sup>-4</sup> mm <sup>3</sup> /Nm)	Mean COF
	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>			
1	0.11049	0.11677	0.1136300	5.711498320	0.107
2	0.07440	0.07868	0.0765400	3.847206560	0.106
3	0.10703	0.03867	0.0728500	3.661732400	0.088
4	0.03610	0.03266	0.0343800	1.728076320	0.077
5	0.02504	0.01405	0.0195450	0.982409880	0.047
6	0.02275	0.01779	0.0202700	1.018851280	0.071
7	0.02161	0.02251	0.0220600	1.108823840	0.074
8	0.02395	0.02201	0.0229800	1.155066720	0.058
9	0.02316	0.02264	0.0229000	1.151045600	0.067



**Figure 5.** The mean COF and wear rates of the produced samples

Figure 6 shows the variation of the COF with the distance during the wear test. When the graphs are examined, it is seen that the mean COF values of the samples at 150 Bar molding pressures are higher than the other groups. This situation indicates that the bonding in these groups does not have adequate load-carrying capacity due to the semi-molten form. It is thought that the fluctuations formed during the test are semi-molten grains that break off from the surface and stuck in the contact area during the test. This situation is also seen in the test results of other samples produced at low molding temperatures. It is seen that the load-carrying ability of polymeric materials depends on a drastically complete molten polymer particle by the use of increased molding pressure and temperature (Sample 4-7). When the COF diagram of sample-5 is examined, no fluctuation is also observed, with this sample performing the highest wear resistance. This phenomenon occurs since the amount of fragmentation from the surface is not sufficient due to the high surface strength. A similar situation can be seen in sample 8, molded at a temperature of 150°C and a pressure of 350 Bar. This sample behavior shows a critical threshold at the molding temperature, which is 150°C. It is seen that increasing molding temperature causes an increase in the mean COF value. As the molding temperature rises, crystallinity gets lower, and as a result, crystallinity decreases in the

material. Therefore, polymeric materials molded at high temperatures are more ductile. Therefore, the load-carrying capacity is reduced (Gürgen, 2019; Kanaga et al., 2008; Mourad et al., 2009; Oral et al., 2010; Wu et al., 2002).



**Figure 6.** Mean COF variation based on the distance for the produced samples

Figure 7 shows the optical microstructure of the worn surfaces. It is seen that abrasive and adhesive wear are effective on the surfaces. Abrasive wear effects on the samples are seen as deep traces and voids. The signs of adhesive wear could be seen as fragments from the surfaces due to the increased temperature based on friction. When the surface of sample 1 with the highest wear rate is examined, it is seen that both abrasive and adhesive wear signs are evident on the surface. Semi-molten particles appear on the surface. These particles are on the surface and have low bonding strength due to the low molding pressure and temperature. Fragmented particles could also be seen in all 150 Bar molding pressure samples (1, 2, and 3). The particles ruptured from the contact zone repetitively over time and fluctuated the friction behavior. A similar situation was observed at all low-temperature and pressure molded samples (Samples 4 and 7). It is observed that the abrasive effects are reduced in molding performed at 150°C temperature. Semi-molten particles are eliminated due to



the high fusion in the microstructure. The wear effects are reduced. Therefore, the highest wear resistance was observed in samples 5 and 8, respectively. Although the increase in the molding temperature provided good bonding of the structure, it caused softening due to crystallinity and weakened the microstructure against abrasive wear (Samples 6 and 9).

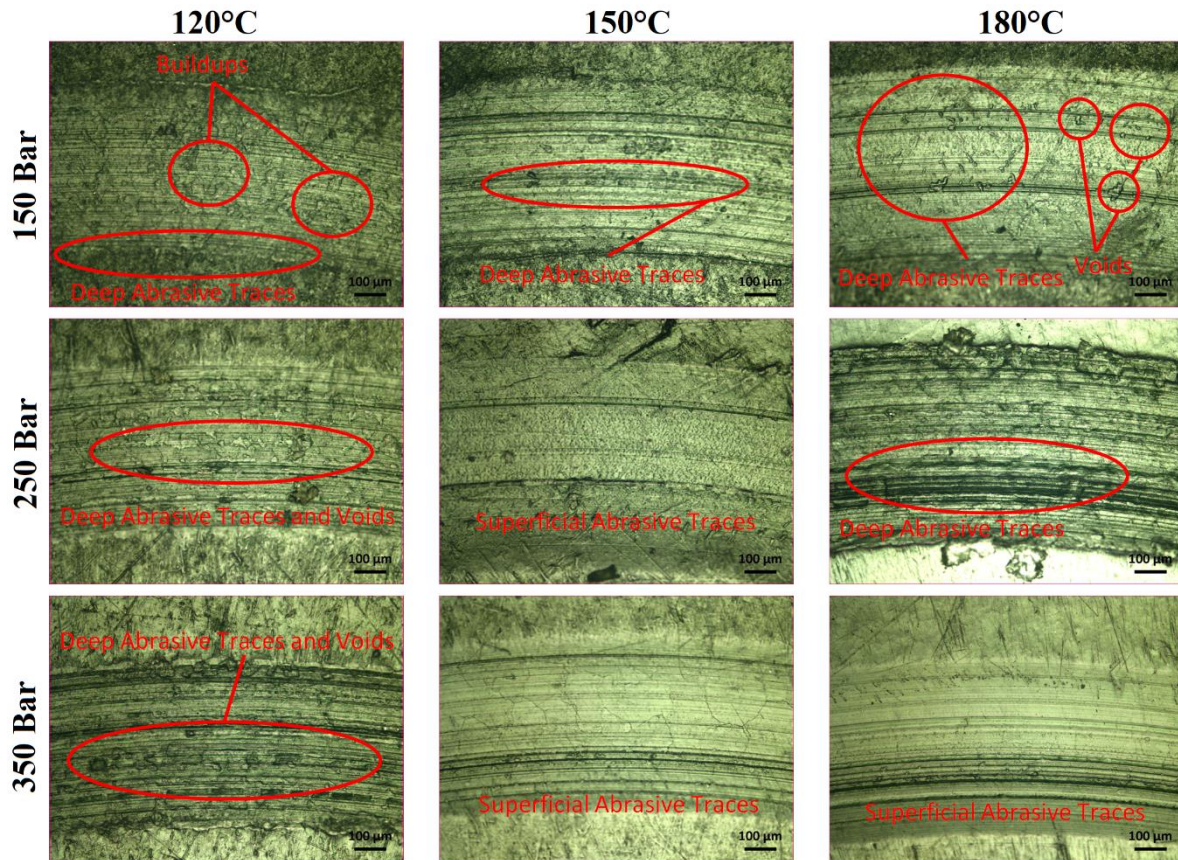


Figure 7. Optical microstructure images of the worn surfaces of the samples

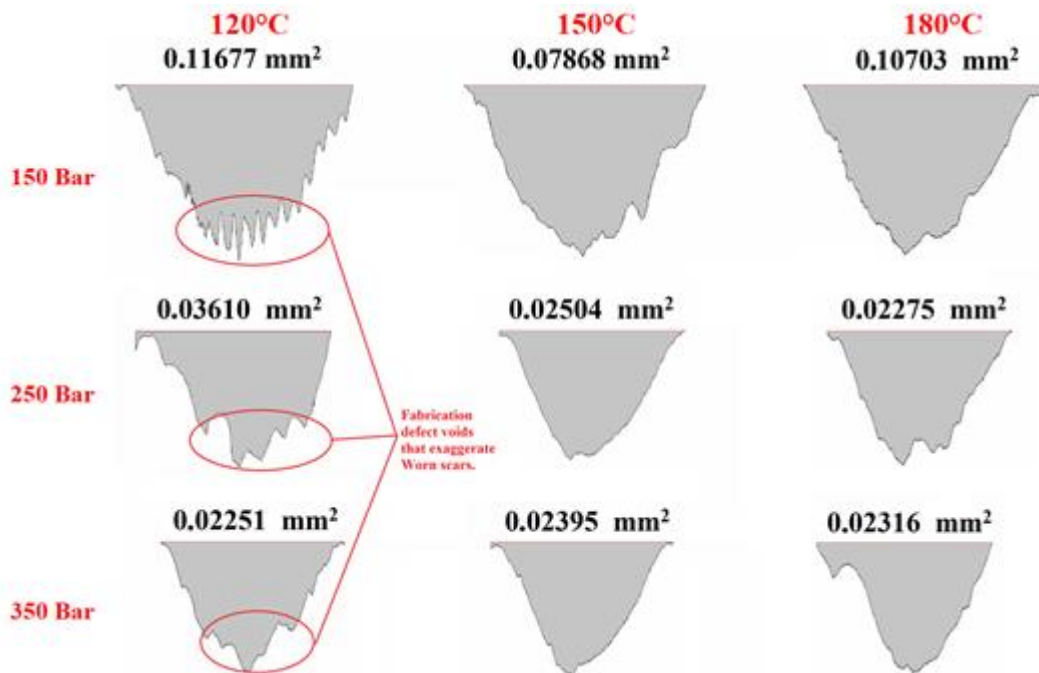


Figure 8. Highest measured cross-sectional surface profile of the worn surfaces of the samples

Figure 8 shows the cross-sections of the worn surfaces. There are deep pits in the bottom of the worn channels of samples 1, 4, and 7. These pits are the cavities formed in the microstructure due to low molding pressure and temperature. Together with the formed worn channel, these voids merged and affected the wear resistance adversely. With increasing molding pressure and temperature, the voids decreased as the internal microstructure of the material was completely joined (Samples 5, 6, and 8, 9). Samples 5 and 8 have the lowest worn area. One can infer that these samples have optimum molding pressure and temperature combinations and exhibit the highest wear resistance.

#### **4. CONCLUSION**

In this study, UHMWPE polymeric bearing material was produced by compression molding technique at different molding pressures and temperatures. Factors affecting molding technique were examined based on microstructure, mechanical and tribological properties. The obtained findings in the experimental studies are summarized below.

- It was determined that microstructural bonds were not sufficient at low molding temperatures.
- The samples produced at molding temperatures of 150°C and above exhibit better microstructural properties such as good bonding and elimination of voids.
- It has been determined that the molding temperature is more effective than the molding pressure in material properties. More ductile structures were obtained due to the increase in crystallinity in the molding process at 180°C.
- Increasing molding pressure and temperature improves the powder consolidation, so the hardness and wear resistance increase.
- Considering the results found, 250 Bar and 150°C were considered as the optimum molding pressure and temperature that can be used for polymeric bearing production. The machine parts produced from the samples with this combination would provide superior wear resistance.

#### **5. CONFLICT OF INTEREST**

Author approves that to the best of their knowledge, there is not any conflict of interest or common interest with an institution/organization or a person that may affect the review process of the paper.

#### **6. AUTHOR CONTRIBUTION**

Esad Kaya determined the concept and design process of the research and research management, data collection and analysis, data analysis and interpretation of results.

#### **7. REFERENCES**

- Bahadur S., The Development Of Transfer Layers And Their Role In Polymer Tribology. *Wear* 245, 92-99, 2000.
- Dearn K., Hoskins T., Petrov D., Reynolds S., Banks R., Applications Of Dry Film Lubricants For Polymer Gears. *Wear*, 298-299, 99-108, 2013.
- Feyzullahoglu E., Saffak Z., The Tribological Behaviour Of Different Engineering Plastics Under Dry Friction Conditions. *Materials & Design*, 29(1), 205-211, 2008.

- Ge S., Wang Q., Zhang D., Zhu H., Xiong D., Huang C., Huang X., Friction And Wear Behavior Of Nitrogen Ion Implanted UHMWPE Against ZrO<sub>2</sub> Ceramic. *Wear*, 255, 1069-1075, 2003.
- Ginzburg B., Tochilnikov D., Bakhareva V., Anisimov V., Kireenko O., Polymeric Materials For Water-Lubricated Plain Bearings. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 79(5), 695-706, 2006.
- Gürgen S., Wear Performance Of UHMWPE Based Composites Including Nano-Sized Fumed Silica. *Composites Part B: Engineering*, 173, 2019.
- Hüseyin Ü., Yetgin S., ÇYMAPE Ve PA-6 Mühendislik Polimerlerinin Aşınma Ve Sürtünme Davranışlarının İncelenmesi. *Türk Bilim Araştırma Vakfı Dergisi*, 3(2), 145-152, 2010.
- Jintang G., Tribochemical Effects In Formation Of Polymer Transfer Film. *Wear*, 245(1-2), 100-106, 2000.
- Kanaga S., Bruck L., Sundararajan S., Wang J., Lin Z., Xu H., Li X., Friction And Wear Behavior Of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene As A Function Of Polymer Crystallinity. *Acta Biomater*, 4(5), 1401-1410, 2008.
- Klapperich C., Komvopoulos K., Pruitt L., Tribological Properties and Microstructure Evolution of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene. *Journal of Tribology*, 121(2), 394-402, 2008.
- Koç R., Mühendislik Plastiklerinin Aşınma Davranışlarının Deneysel İncelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8, (2), 27-40, 2011.
- Kuma A., Bijwe J., Sharma S., Hard Metal Nitrides: Role In Enhancing The Abrasive Wear Resistance Of UHMWPE. *Wear*, 378-379, 35-42, 2017.
- Mourad I., Fouad H., Elleithy R., Impact Of Some Environmental Conditions On The Tensile, Creep-Recovery, Relaxation, Melting And Crystallinity Behaviour Of UHMWPE-GUR 410-Medical Grade. *Materials & Design*, 30(10), 4112-4119, 2009.
- Oral E., Ghali W., Rowell L., Micheli R., Lozynsky J., Muratoglu K., A Surface Crosslinked UHMWPE Stabilized By Vitamin E With Low Wear And High Fatigue Strength. *Biomaterials*, 31(27), 7051-7060, 2010.
- Panin V., Kornienko A., Nguensuan T., Ivanova R., Korchagin A., Shilko V., Pleskachevskii M., Wear Resistance Of Composites Based On Hybrid UHMWPE-PTFE Matrix: Mechanical And Tribotechnical Properties Of The Matrix. *Journal of Friction and Wear*, 36(3), 249-256, 2015.
- Rymuza Z., Polymer Bearings. In *Encyclopedia of Tribology*, Springer, Boston, pp. 2557-2562.
- Sarı A., Salman Ö., Experimental Investigation Of Tribological Properties Of Polymers Bearing Material. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 16(2), 446-453, 2016.
- Tong J., Ma Y., Jiang, M., Effects Of The Wollastonite Fiber Modification On The Sliding Wear Behavior Of The UHMWPE Composites. *Wear*, 255(1-6), 734-741, 2016.
- Uzuner F., Gediktaş M., Salınım Hareketi Yapan Radyal Kaymalı Plastik Yataklarda Sürtünme. *İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi / D*, 3(6), 2010.
- Wang S., Ge S., The Mechanical Property And Tribological Behavior Of UHMWPE: Effect Of Molding Pressure. *Wear*, 263(7-12), 949-956, 2007.
- Wu J., Buckley P., O'Connor J., Mechanical Integrity Of Compression-Moulded Ultra-High Molecular Weight Polyethylene: Effects Of Varying Process Conditions. *Biomaterials*, 23(17), 3773-3783, 2002.
- Xiong D., Ge S., Friction And Wear Properties Of UHMWPE/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Under Different Lubricating Conditions. *Wear*, 250(1-12), 242-245. 2001.

**Araştırma Makalesi / Research Article**

**Pomza Taşının Otomotiv Sürtünme Malzemesi Olarak Kullanımının Araştırılması**

Emin ÇENGELCİ<sup>1\*</sup>, Hüseyin BAYRAKÇEKEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, İncehisar Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5296-0685>, ecengelci@aku.edu.tr

<sup>2</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1572-4859>, bceken@aku.edu.tr

**Geliş/ Received:** 11.11.2022;

**Kabul / Accepted:** 07.01.2023

**ÖZET:** Pomza taşı süngerimsi, gözenekli ve volkanik olaylar sonucu oluşmuş volkanik bir kayadır. Pomzanın içeriğinde SiO<sub>2</sub> oranı kayaca abraziflik, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşimi ise ateşe ve ısıya yüksek dayanım özelliği kazandırmaktadır. Pomza taşı inşaat sektöründe yaygın kullanılmakla birlikte tarım sektörü, kimya sektörü, tekstil sektörü ve aşındırıcı sanayi gibi endüstri alanlarında da kullanılmaktadır. Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde fren balataları için kullanılmak üzere pomza taşı ile alümina, pirinç tozu, cashew, reçine, çelik elyaf, grafit, barit maddelerinden farklı karışım oranlarında fren balata numuneleri üretilmiştir. Üretilen balata numunelerinin aşınma oranı ve sürtünme katsayıları fren balata test cihazında ölçümü yapılmıştır. Deney öncesi ve sonrasında disk pürüzlülüğü pürüzlülük test cihazı ile ve balataların özgül ağırlıkları ölçülmüştür. Elde edilen değerlere göre en yüksek ortalama sürtünme katsayısı P12 numunesinde 0.37, minimum aşınma değeri P3 numunesinde  $0.127 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{Nm}$ , minimum pürüzlülük değeri P12 numunesinde %25.93 meydana gelmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Fren Balatası, Sürtünme Katsayısı, Pomza Taşı, Triboloji, Aşınma

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: ecengelci@aku.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Çengelci, E., Bayrakçeken, H., (2023). Pomza Taşının Otomotiv Sürtünme Malzemesi Olarak Kullanımının Araştırılması. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 50-63.

## Investigation of the Use of Pumice Stone as Automotive Friction Material

**ABSTRACT:** Pumice stone is a spongy, porous and volcanic rock formed as a result of volcanic events. The ratio of SiO<sub>2</sub> in the content of pumice gives the rock abrasiveness, and the composition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> provides high resistance to fire and heat. Although pumice stone is widely used in the construction sector, it is also used in industrial areas such as the agriculture sector, the chemical sector, the textile sector and the abrasive industry. In this study, brake lining samples were produced from pumice stone and alumina, brass powder, cashew, resin, steel fiber, graphite, barite materials at different mixing ratios to be used for brake linings in the automotive industry. The wear rate and friction coefficients of the produced lining samples were measured in the brake lining tester. Before and after the experiment, disc roughness and specific weights of the pads were measured with a roughness tester. According to the values obtained, the highest average friction coefficient was 0.37 in the P12 sample, the minimum wear value was  $0.127 \times 10^{-7}$  cm<sup>3</sup>/Nm in the P3 sample, and the minimum roughness change was 25.93% in the P12 sample.

**Keywords:** Brake Pad, Friction Coefficient, Pumice Stone, Tribology, Wear

### 1. GİRİŞ

Dünyada ve Ülkemizde son yıllarda artan nüfus sayısına bağlı olarak taşıt sayıları da hızla artmaktadır. Kasım 2022 itibariyle Türkiye'deki trafiğe kayıtlı toplam taşıt sayısı 26 milyon 349 bin 156 adettir (TÜİK, 2022). Taşıtların hareket esnasındaki kinetik enerjilerini absorbe ederek taşıtı yavaşlatma veya durdurma görevi gören emniyet sistemlerinden birisi de fren sistemleridir. Fren pedalına her basıldığında yüksek ısıya maruz kalan fren balataları aşırı sürtünmeden dolayı belirli bir zamana kadar çalışmakta, fren balatasının ömrü sürüş tarzına ve balatanın malzemesine bağlı olarak farklılık gösterse de genellikle 40-50 bin km civarlarında değiştirilmesi gerekmektedir (Toyota, 2022). Firmalar ve araştırmacılar daha kaliteli ve ekonomik fren balataları üretmek için çalışmaktadırlar.

Fren balatalarından genel olarak sıcaklık, frenleme basıncı ve hızdan bağımsız bir sürtünme katsayısı değeri sağlaması, sürtünme katsayısı değişiminin az olması, aşınma direnç değerinin yüksek olması, kampana ya da disk yüzeyini az aşındırması, sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklı olması, aynı zamanda sağlığa zararlı maddeler içermemesi beklenmektedir (Aras, 2019). Fren balata kompozitleri, bağlayıcı malzemeler, takviye elemanları, yağlayıcılar, sürtünme düzenleyiciler ve dolgu malzemelerini içeren çok bileşenli kompozitlerdir (Sugözü ve Sugözü, 2020). Fren balatalarında asbest kullanımı frenleme açısından uygun olmasına rağmen kansorejen etkiye sahip olduğu için yasaklanmıştır. Asbest yerine son yıllarda alternatif malzeme kullanımı için çalışmalar artmıştır. Taşıt cinsine göre balata içeriği değişmekte olup ticari fren balatası üreten firmalar balata reçetelerini gizli tutmaktadırlar. Yapılan çalışmalar incelendiğinde örneğin bağlayıcı olarak fenolik reçine (Binda ve ark., 2020), takviye edici elyaflar (Singh ve ark., 2020), yağlayıcı grafit (Ahlawat ve ark., 2019), sürtünme düzenleyici alümina (Pujari ve Srikanan, 2019) pirinç tozu (Jeganmohan ve Sugözü, 2019), dolgu maddesi barit (Che ve ark., 2020), uçucu kül (Ahlawat ve ark., 2019) kullanılmaktadır.

Timur ve Kılıç, balata özelliklerini iyileştirmek amacıyla balata bileşiminde mermer atıklarının tozunu kullanmışlardır. Mermer tozunun frenleme performansında olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiş ayrıca mermer atıklarının değerlendirilmesi üretim maliyetinin azaltılması açısından önemli olduğunu belirtilmişlerdir (Timur ve Kılıç, 2013).

Yavuz ve Bayrakçeken, otomobiller için huntit minerali esaslı kompozit fren balataları üretmişler, fren balatası standartlarına ve literatürde yapılan çalışmalara benzer performans sergilediğini ifade etmişlerdir (Yavuz ve Bayrakçeken, 2022).

Akıncıoğlu, fındık kabuğu, ceviz kabuğu, bor oksit, boraks ve wollastonite tozu kullanarak organik, sağlığa ve çevreye zararsız fren balataları üretmiştir. Farklı kompozisyonlar denenerek en ideal karışım elde edilmek istenmiştir. Aşınma sürtüne testleri için Pin-on-disk, Chase tipi ve özel tasarım cihazlar kullanmıştır. Cihazlardan elde edilen sürtünme katsayısı değerleri bütün numuneler için 0,30-0,55  $\mu$  arasında olduğunu ve test sonuçlarının standartlara uygun olduğunu belirtmiştir (Akıncıoğlu, 2018).

Kchaou ve arkadaşları ağırlıkça %5, 10 ve 15 miscanthus lifi kullanarak yeni sürtünme malzemelerini geliştirmişlerdir. Sürtünme malzemelerini, uluslararası standarda göre fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özellikleri açısından test etmişler ve sonuçlar, diğer doğal liflerle aynı eğilimle faydalı olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu nedenle, bu doğal bileşenin fren sürtünme malzemesinin geliştirilmesinde faydalı olduğunu kanıtlamışlardır (Kchaou ve ark., 2021).

Türkiye de Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü'nün (MAPEG) 2020 verilere göre; toplam 2,2 milyar ton pomza rezervimiz mevcut olup, 2021 pomza üretimi yaklaşık 8.7 milyon ton civarındadır (MAPEG, 2022). Ülkemizde bulunan kaynaklardan balata üretiminin gerçekleştirilmesiyle, balataların maliyeti azaltılacak ayrıca pomza atıklarının da değerlendirilmesi sağlanmış olacaktır. Pomza inşaat sektöründe, endüstriyel alanlarda (Anonim, 2022) tekstil, ziraat ve kimya (Anonim, 2015) alanlarında kullanımının yanı sıra otomotiv sektöründe fren balatalarında sürtünme düzenleyici olarak da kullanılabilir.

Bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak balata kompoziti içerisinde sürtünme düzenleyici olarak ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 oranlarında pomza tozu kullanılmıştır. Üretilen balata kompozitlerinin yoğunluk, sertlik, aşınma oranı, sürtünme katsayısı, sıcaklık ve disk pürüzlülüğü deneysel olarak incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Kompozit yapıda olan fren balataları toz metalürjisi üretim yöntemleri ile üretilmektedirler. Fren balatalarının istenilen özellikte performans sergilemeleri için farklı özellikteki malzemelerin bir arada kullanılması ve bu malzemelerin doğru seçimi önemli olmakla birlikte kompozit yapıya uygun malzemelerden fren balataları üretilmesi gerekmektedir.

Yapılan çalışmada fren balatası kompozitlerini oluşturan çelik elyaf, fenolik reçine, barit, grafit, pirinç tozu, cashew maddeleri sabit oranlarda, alümina ve pomza ise farklı oranlarda kullanılmıştır. Numune içeriği ve karışım oranları ağırlıkça % olarak Çizelge 1'de verilmiştir.

0.001g hassas terazi ile ölçülen kütlece farklı oranlardaki balata tozları daha sonra homojen olarak karışabilmesi için kinetik karıştırıcı da 60 d/dk' da 15 dakika karıştırılmışlardır. Karışımı yapılan tozlar 6 gözlü 25mm çapındaki kalıba konularak hidrolik pres ile 15 MPa basınç altında 150 °C sıcaklıkta 15 dakika preslenmiştir. Kalıp için yüzey sertliği ve malzemesi toz metalürjisi üretim yöntemine uygun olan 62 HRC genel imalat çeliği seçilmiştir. 40 tona kadar hidrolik presle çalışabilecek özellikte, kalıbın iç kısmındaki sıcaklığın anlık ölçülebildiği termokupl sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Ayrıca seramik rezistans ile sıcaklığın 0-400 °C arasında kontrol edilebildiği elektrik bağlantı elemanlarını içermektedir.

**Çizelge 1.** Numune içeriği ve karışım oranları \*

Özellik	Malzeme	P3	P6	P9	P12
<b>Sürtünme düzenleyici</b>	Pomza	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>12</b>
	Alümina	<b>12</b>	<b>9</b>	<b>6</b>	<b>3</b>
	Pirinç tozu	5	5	5	5
	Cashew	5	5	5	5
<b>Bağlayıcı</b>	Reçine	15	15	15	15
<b>Takviye edici</b>	Çelik elyaf	15	15	15	15
<b>Yağlayıcı</b>	Grafit	5	5	5	5
<b>Dolgu</b>	Barit	40	40	40	40
	Toplam	100	100	100	100

\* Ağırlıkça yüzdesel (%)

Presleme işlemi sonrası kalıptan çıkartılan numuneler, reçinenin tamamen kürlenmesi, homojenliğin tam olarak sağlanması, üretimde ortaya çıkabilecek ısıl hataları minimuma indirmek için ısıl işlem fırınında 170 °C sıcaklıkta 5 saat süreyle kürleme işlemine tabi tutulmuştur. Üretim sonrasında numunelerin özgül ağırlık karakterizasyonu JIS-D-4418 standardı kullanılarak Arşimet prensibine göre çalışan bir aparatla ölçülmektedir. (Kchaou ve ark., 2021).

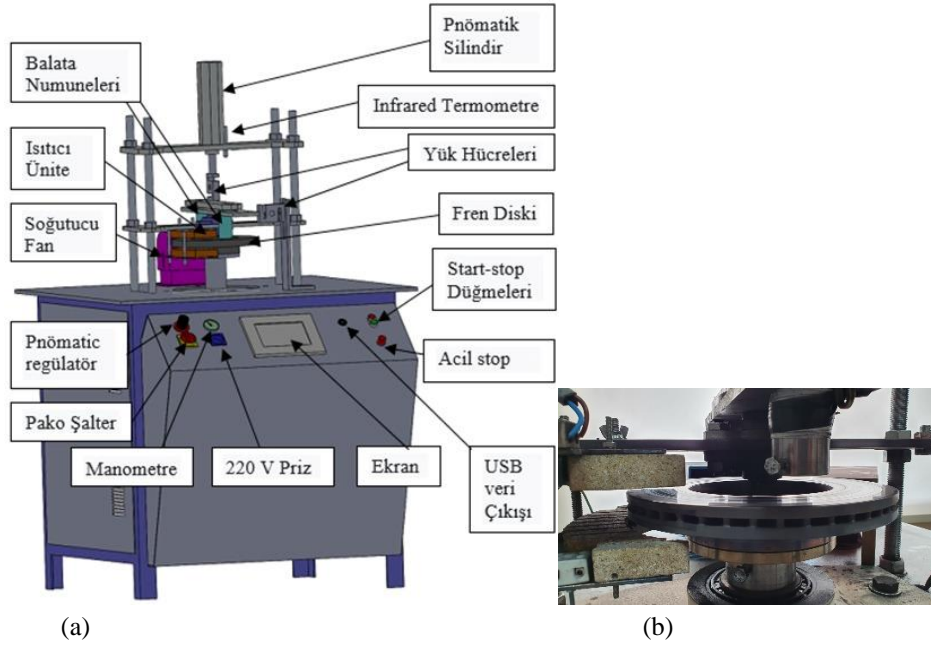
Pomza tozu ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 oranlarında kullanılarak 4 farklı oranda kompozit fren balatası numunesi üretilmiştir. (Şekil 1.) Numune bileşimleri içeriğinde bulunan pomza miktarına göre P3'den P12'ye kadar isimlendirilmiştir. P harfinin sonundaki oran bileşim içerisinde ne kadar oranda pomza olduğunu belirtmektedir.

**Şekil 1.** Numune üretim basamakları



Şekil 2. Kinetik tip karıştırıcı

Toz numuneler Şekil 2’de gösterilen kinetik tip toz karıştırıcının karıştırma haznesine konulduktan sonra istenilen yönde, 50 d/dk ile 150 d/dk aralığındaki değişen devirlerde ve cihaz üzerinde bulunan zaman rölesi ile istenilen sürede karıştırılabilmektedir.



Şekil 3. (a) Fren balata test cihazı (Yavuz ve Bayrakçeken, 2022) (b) Balata numunesi bağlantı kısmı

Bu çalışmada kullanılan fren balata test cihazı Şekil 3’de gösterilmiştir. 11kW elektrik motoruna, sıcaklığın 50 °C ile 400 °C derece arasında sabit değerde kontrol edilebilmesini sağlayacak üniteye ve PLC kontrol sistemine sahip fren balata test cihazında motor hızı cihaz ekranından istenilen hıza ayarlanabilmekte, pnömatik yükleme yapılabilen cihazda anlık olarak balataların üzerindeki yük değeri, sürtünme kuvveti değeri ve infrared termometre sayesinde eş zamanlı olarak sıcaklık değerleri görülebilmektedir. Test süresince sıcaklık, yük ve sürtünme kuvveti değerleri kayıt altına alınmaktadır. Fren balata test cihazında kütlece farklı oranlardaki P3-P6-P9-P12 numunelerinin sürtünme katsayısı, kütle metoduyla aşınma oranı değerleri ve sıcaklık ölçümleri TS 555 (2019) standardına göre deneysel olarak incelenmiştir.



### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 4’te yoğunluk ölçüm değerleri verilmiştir. Yoğunluk P3 numunesinde  $2.652 \text{ g/cm}^3$  P12 numunesinde  $2.580 \text{ g/cm}^3$  olarak ölçülmüştür. Minimum yoğunluk değeri maksimum yoğunluk değerlerinden %3 daha azdır. Fren balatası kompoziti içerisindeki pomza miktarı arttıkça, yoğunluk azalmıştır. Pomza yoğunluğu  $2 \text{ g/cm}^3$ , alümina yoğunluğu  $3.95 \text{ g/cm}^3$ ’dür. Pomza yoğunluk değerinin alümina yoğunluk değerinden daha az olmasından, numunelerin yoğunluk değerlerinin azalmış olabileceği değerlendirilmiştir. Matematiksel olarak Eşitlik 1’ e göre aşınma oranı ile yoğunluk ters orantılıdır. Numunelerde pomza miktarı arttıkça yoğunluk azalmış, aşınma oranı artış göstermiştir.

$$W_a = \frac{\Delta G}{SMd} \quad (1)$$

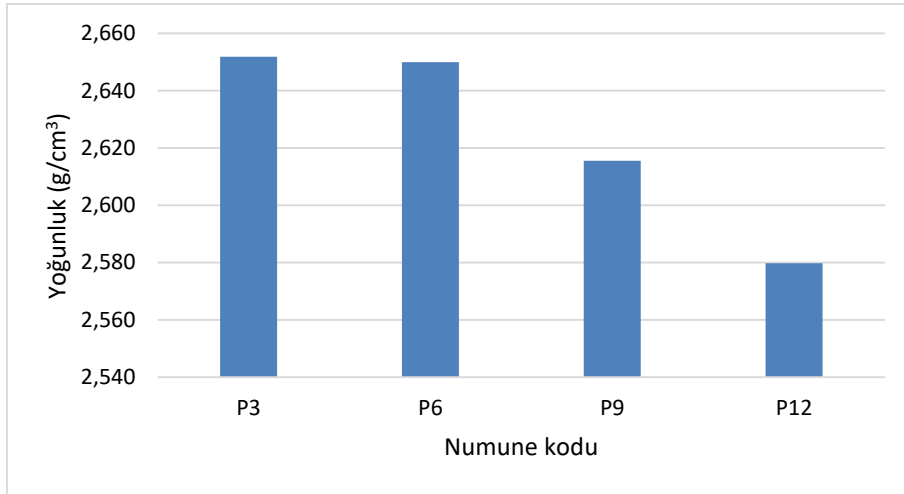
$W_a$ : Aşınma oranını [ $\text{cm}^3/\text{Nm}$ ],

$\Delta G$ : Ağırlık kaybını [g],

S: Kayma mesafesini [m],

M: Yükleme ağırlığını [N],

D: Aşınan malzemenin yoğunluğunu [ $\text{g/cm}^3$ ] göstermektedir.



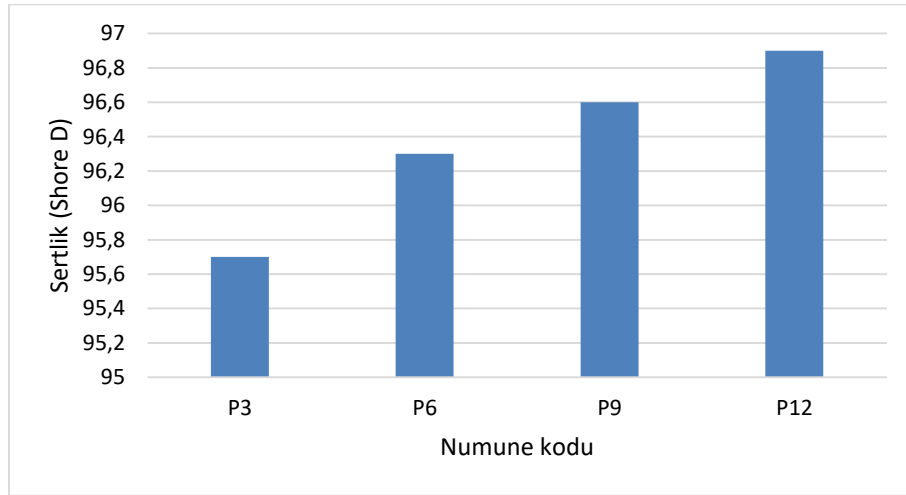
Şekil 4. Numune yoğunluk değerleri

Fren balataları sertlik değerleri ölçümünde farklı birçok cihaz kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemlerden biri de Shore D cihazı ile ölçümlerin yapılmasıdır (Akıncıoğlu ve ark., 2021). Sertlik ölçümü ASTM D2240 (2021) standardında cam, elyaf, kauçuk, plastik, reçine vb. sert malzemelerin sertlik ölçümünde kullanılan Shore D durometre sertlik ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.) Dijital sertlik ölçüm cihazı 0-100 HD aralığında ölçüm yapabilen, 0.5 HD hassasiyette, 0.1 mm çapında iğneye sahiptir. Aşınmış yüzeye sahip her numune için üç farklı numuneden, beş farklı ölçüm noktasından alınan değerlerin ortalaması hesaplanmıştır.



Şekil 5. Shore D sertlik cihazı

Tüm numuneler için Shore D sertlik ölçüm sonuçları Şekil 6’da verilmiştir. Sertlik değerleri her numune kodu için 5 farklı bölgeden ve 3 ayrı numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak belirlenmiştir. Değerler birbirine yakın olmakla birlikte en yüksek sertlik değeri ile en düşük sertlik değeri arasında 0.8 Shore D kadar fark görülmüştür. Maksimum sertlik P12 numunesinde ölçülürken, minimum sertlik P3 numunesinde elde edilmiştir. Numunelerin standart sapması 0.08 olarak hesaplanmıştır. Fren balatası içerisindeki Pomza miktarının artışı ile sertlik değerlerinde artışın meydana geldiği düşünülebilir. Yüksek sertlik bağdaki artıştan kaynaklanmaktadır (Stadler ve ark., 2007). Balatanın sertliğinin artması aşınma direncinin de artmasına sebep olmaktadır (Ademoh ve Olabisi, 2015). Üretilen fren balatalarının sertlik değerlerini fren balatalarının kompozisyonları ve oranları, üretim yöntemleri gibi birçok etmen etkilemektedir (Maleque ve ark., 2012).



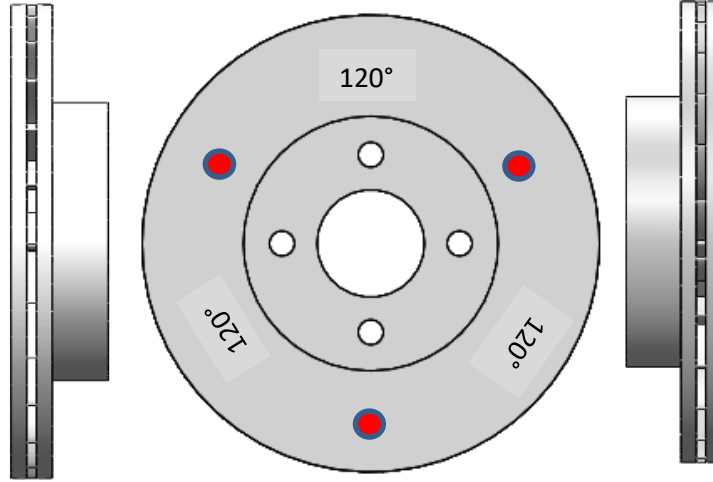
Şekil 6. Shore D sertlik ölçüm sonuçları

Disk pürüzlülük testleri için Time TR220 test cihazı kullanılmıştır (Şekil 7).



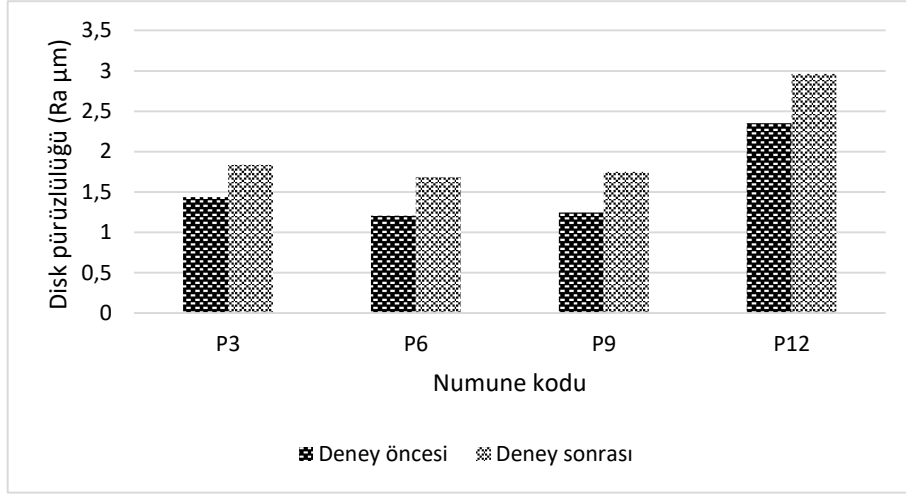
Şekil 7. Pürüzlülük test cihazı

Disk yüzeyinde oluşan Ra pürüzlülük değerleri, 6 m/s disk hızında deney öncesi ve bir saatlik çalışmadaki deney sonrasında Şekil 8’de gösterilen disk üzerinde üç farklı ölçüm noktasından ölçülmüştür. Ölçümler 40  $\mu\text{m}$  ölçüm aralığında ve 2.5 mm ölçüm uzunluğunda gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre deney öncesi ve deney sonrasındaki üç ölçüm noktasından alınan ortalama disk pürüzlülük değerleri karşılaştırılmıştır.

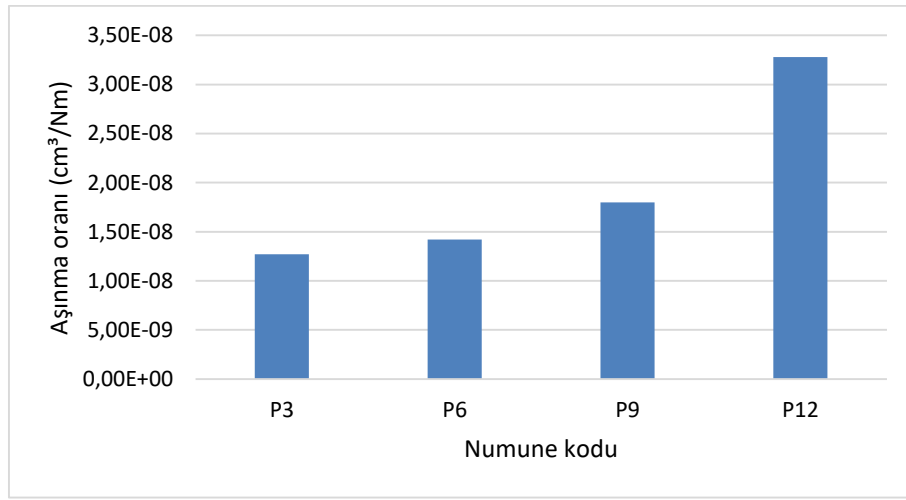


Şekil 8. Disk pürüzlülüğü ölçüm noktaları

Disk pürüzlülük değerleri deney öncesi ve sonrası olmak üzere diskin 120’şer derecedeki sabit noktalarından Ra (Şekil 9) değerleri ölçülmüştür. Üç ölçümün ortalaması alınarak değerler hesaplanmıştır. Deney öncesi ve deney sonrasında ölçülen disk pürüzlülükleri arasındaki yüzdesel değişimin dikkate alınmasıyla sonuçların yorumlanmasında doğru sonuca gidilebilir. Ra değerleri için % olarak en küçük fark %25.93 P12 numunesinde, en yüksek fark %27.79 olarak P3 numunesinde ölçülmüştür. Numunelerde yüzey pürüzlülüğü yüksek olan malzemelerin aşınma direnci daha düşük olmaktadır (Sugözü, 2016).

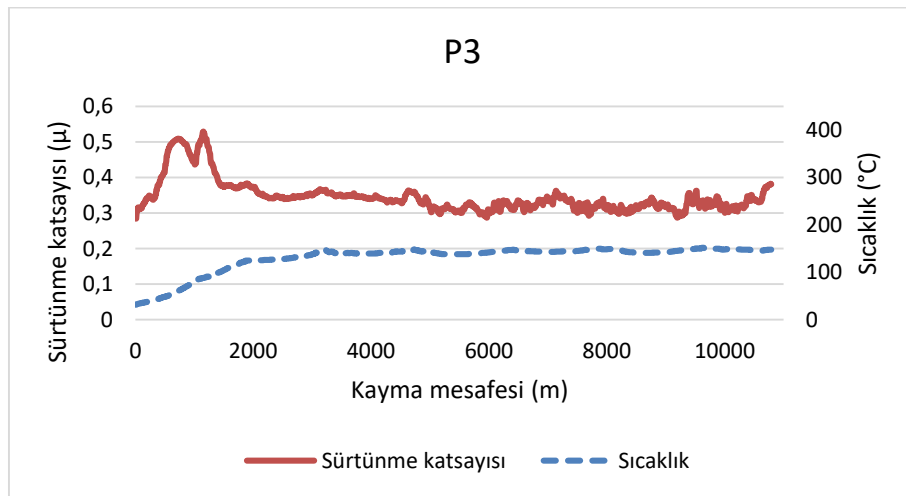


Şekil 9. Deney öncesi ve sonrası disk pürüzlülük Ra değerleri



Şekil 10. Aşınma oranı değerleri

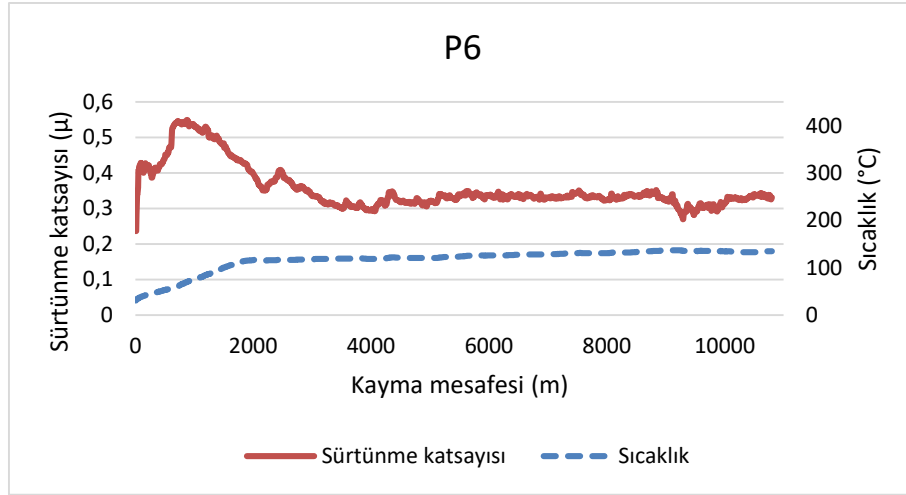
Şekil 10’da tüm numuneler için aşınma oranı değerleri gösterilmiştir. Yapılan deneylerde ortalama sıcaklık değeri 150 °C civarında olup, TS555 (2019) standardın da 150 °C için aşınma oranı değeri en fazla  $0,7 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{Nm}$  olması gerekmektedir.



Şekil 11. P3 kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği

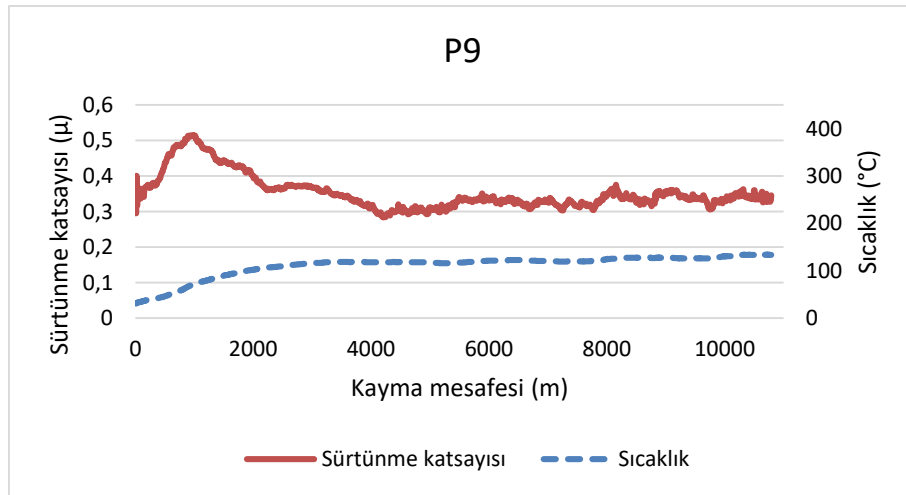
Tüm numuneler için aşınma oranı değerleri bu değer altındadır. Numune içeriğindeki pomza miktarı ve sertlik değerleri arttıkça aşınma oranı değerleri artmıştır. Minimum aşınma oranı P3 numunesinde  $0.127 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{Nm}$ , maksimum aşınma oranı ise P12 numunesinde  $0.328 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{Nm}$  ölçülmüştür.

Fren balata test cihazında tüm numunelerin sürtünme katsayısı için oluşturulan grafiklerde üç deney sonucunun ortalama değerleri grafik haline getirilmiştir. Şekil 11’de ağırlıkça %3 pomza içeren P3 kodlu fren balata numunesinin 30 dakika kayma mesafesindeki sıcaklık ile sürtünme katsayısı değerlerini göstermektedir. Temas yüzeyinde maksimum sıcaklık  $151.7 \text{ }^\circ\text{C}$ , sürtünme katsayısı ortalama 0.36, sürtünme katsayısı kararlılığı ise %67.38’dir.



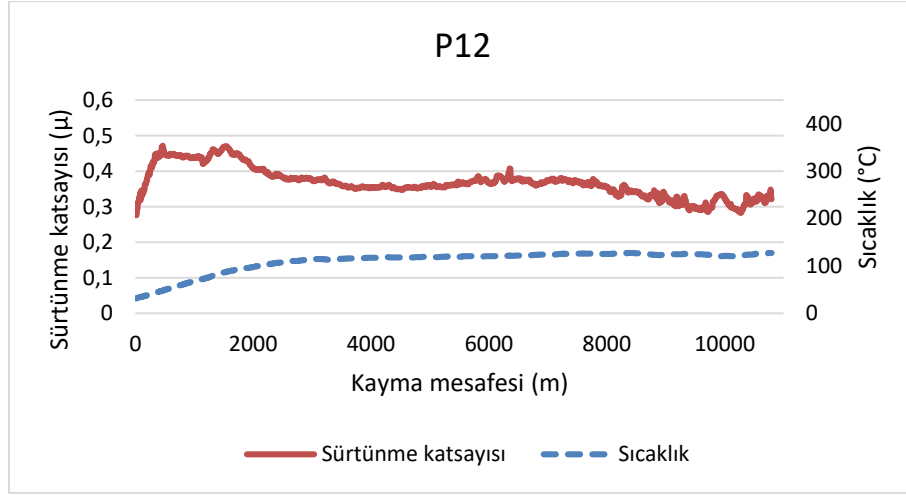
Şekil 12. P6 kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği

Şekil 12 ağırlıkça %6 pomza içeren P6 kodlu fren balata numunesinin 30 dakika kayma mesafesindeki sıcaklık ile sürtünme katsayısı değerlerini göstermektedir. Temas yüzeyinde maksimum sıcaklık  $137.1 \text{ }^\circ\text{C}$ , sürtünme katsayısı ortalama 0.36, sürtünme katsayısı kararlılığı ise %65.45’dir. Grafikler incelendiğinde sürtünme katsayısında az miktarda olsa da inişli çıkışlı sürekli bir değişim görülmektedir. Anderson yaptığı çalışmada sürtünme süresince disk yüzeyindeki temas bölgelerinin içine doğru ısının periyodik olarak sürekli değişmesinden kaynaklandığını belirtmiştir (Anderson, 1992).



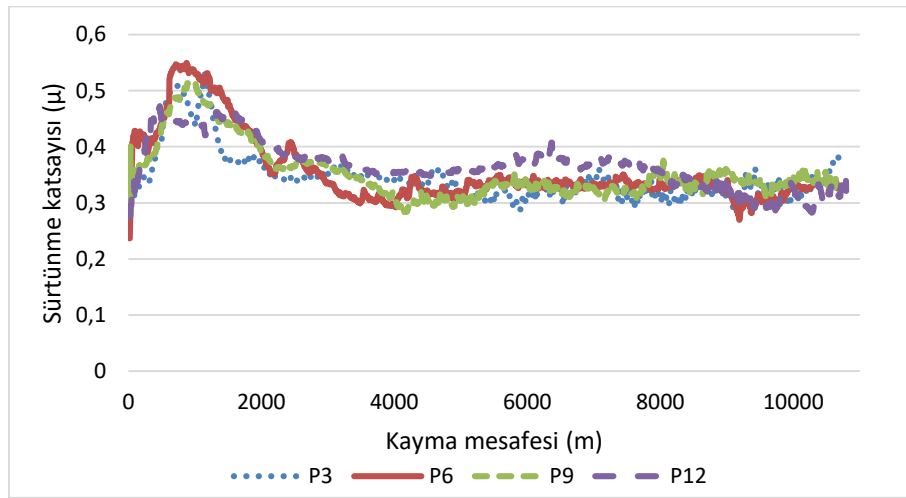
Şekil 13. P9 kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği

Şekil 13 ağırlıkça %9 pomza içeren P9 kodlu fren balata numunesinin 30 dakika kayma mesafesindeki sıcaklık ile sürtünme katsayısı değerlerini göstermektedir. Temas yüzeyinde maksimum sıcaklık 134.7 °C, sürtünme katsayısı ortalama 0.35, sürtünme katsayısı kararlılığı ise %68.62'dir.



Şekil 14. P12 kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği

Şekil 14 ağırlıkça %12 pomza içeren P12 kodlu fren balata numunesinin 30 dakika kayma mesafesindeki sıcaklık ile sürtünme katsayısı değerlerini göstermektedir. Temas yüzeyinde maksimum sıcaklık 127.3 °C, sürtünme katsayısı ortalama 0.37, sürtünme katsayısı kararlılığı ise %77.87'dir.



Şekil 15. P12 kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği

Şekil 15'de P3-P6-P9-P12 numunelerinin kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı grafiği verilmiştir. Sürtünme katsayısı eğrilerinde sürtünme katsayısı değerinin sürekli değiştiği görülmektedir. Sürtünme katsayısı grafiklerinde değerlerin sürekli değişmesi, adhezif aşınmadan dolayı kopan parçacıkların meydana getirdiği yapışma ve tekrar kopma ile temas yüzeylerinin artması ya da azalmasından kaynaklanabilir (Stachowiak ve Batchelor, 2014).

#### 4. SONUÇ

Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü raporlarında farklı sektörlerde kullanıldığı belirtilen, pomza kullanımının, fren balataları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ülkemizde bulunan kaynaklardan balata üretiminin gerçekleştirilmesiyle, balataların maliyeti azalabilecektir. Pomza taşının endüstri de birçok alanda kullanılmasının yanı sıra fren balata kompoziti olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

- Yoğunluk değerleri 2.580-2.652 g/cm<sup>3</sup> değerleri arasında çıkmıştır ve literatürde yapılan çalışmalara benzerlik göstermiştir. Yoğunluğun artması ile aşınma oranı ters orantı göstermektedir. Numunelerde presleme basıncı da yoğunluğu etkilemektedir. (Sugözü, 2016).
- Sürtünme katsayısı ortalama değerleri dikkate alındı. Ortalama sürtünme katsayısı değeri en fazla P12 kodlu numunede elde edildi. Sertliği yüksek olan malzemelerin balata içerisinde yer alması sürtünme testi esnasında balata yüzeyinde sürtünme tabakası oluşturmakta ve balataların sürtünme katsayısını arttırmaktadır. Tüm numunelerin sürtünme katsayısı değerleri standart sınırları içerisinde olduğu görülmüştür.
- Aşınma oranı değerlerinde minimum aşınma oranı istenilmektedir. Minimum aşınma oranı P3 kodlu numunede ölçüldü ve tüm balata numuneleri fren balatası standartları içerisinde çıkmıştır. Fren balataları için sürtünme katsayısı değerlerinin yüksek olması aşınma oranı değerlerinin ise minimum olması istenilmekte dolayısı ile geliştirilen fren balatalarının bu özelliklere uygun olması gerekmektedir (Akagündüz ve ark., 2014).
- Disk pürüzlülüğü diskin kullanım ömrü için önemli bir değerlendirme olup, en fazla disk pürüzlülük değişimi P3 numunesinde %27.79 olarak ölçülmüştür. Genel olarak bakıldığında disk pürüzlülük değerlerinde değişim çok azdır.
- Deney sırasında disk yüzeyindeki sıcaklık artışı en fazla P3 numunesinde 151.7 °C olarak ölçülmüştür. Pomza miktarı attıkça maksimum disk sıcaklığının azaldığı görülmüştür. Fren balatalarından istenen en önemli özelliklerden biri frenleme esnasında sürtünmeden dolayı açığa çıkan ara yüzey sıcaklığındaki artışa bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişimin minimum seviyede olmasıdır (Persson, 1994; Tabor, 1996).

Genel olarak, sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri incelendiğinde üretimi yapılan numunelerde fren balatası standartlarına uygun olduğu belirlenmiştir (TS555, 2019). Bu çalışmada pomza taşından üretimi yapılan tüm karışım oranları için fren balatalarında kullanılabilir olduğu gözlemlenmiştir. Ticari amaçlı olarak dünya çapında otomobillerin yanı sıra kamyon, çekici, golf aracı ve yarış otomobilleri gibi araçlarda kullanılabilir olacaktır.

#### 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından “19. FEN.BİL. 39” kodlu proje ile desteklenmiştir.

#### 6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## 7. YAZAR KATKISI

Emin ÇENGELCİ veri toplama ve makale taslağının oluşturulmasında, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetiminde, veri analizi ve yorumlamasında, son onay ve tam sorumluluk almada, Hüseyin BAYRAKÇEKEN fikrinsel içeriğin eleştirel incelenmesinde, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetiminde, veri analizi ve yorumlamasında, son onay ve tam sorumlulukta makale katkısı sağlanmıştır.

## 8. KAYNAKLAR

- Ademoh N. A., Olabisi A. I., Development and evaluation of maize husks (asbestos-free) based brake pad, *Industrial Engineering Letters* 5, 2, 2015.
- Ahlawat V., Anuradha P., Kajal S., Preference selection of brake friction composite using entropy-VIKOR technique, In *Materials Today: Proceedings* 46, 9573–9579, 2019.
- Akagündüz E., Topuz A., Güneş M., 2014, Effects of fly ash additive on the properties of railway composite disc brake linings, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, *Sigma*, 32, 322–333.
- Akıncıoğlu G., Ticari araç balatalarına ceviz ve fındık kabuğu tozu katkılarının aşınma ve sürtünme davranışına etkisinin incelenmesi, *Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (Basılmış)*, 2018.
- Akıncıoğlu G., Uygur İ., Akıncıoğlu S., Öktem H., Friction-wear performance in environmentally friendly brake composites: a comparison of two different test methods, *Polymer Composites* 42, 4461–4477, 2021.
- Anderson A. E., Friction and wear of automotive brakes, USA, Friction, lubrication and wear technology, *ASM Handbook*, 1992.
- Anonim 2015. <https://ahika.gov.tr/assets/ilgili-dosyalar/Pomza-Arastirma-ve-Uygulama-Merkezi-Fizibilite-Raporu.pdf> / (Erişim Tarihi: 24.12.2022).
- Anonim 2022. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/pomza> / (Erişim Tarihi: 03.11.2022).
- Aras S., Organik malzeme esaslı hibrit sürtünme kompozitlerinin balata üretiminde kullanılabilirliğinin incelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (Basılmış)*, 2019.
- Binda F. F., Oliveira V. D. A., Fortulan C. A., Palhares L. B., Santos C. G., Friction elements based on phenolic resin and slate powder, *Journal of Materials Research and Technology* 9 (3), 3378–3383, 2020.
- Che Q., Li H., Zhang L., Zhao F., Li G., Guo Y., Zhang, J., Role of carbon nanotubes on growth of a nanostructured double-deck tribofilm yielding excellent self-lubrication performance, *Carbon*, 161, 445–455, 2020
- Jeganmohan S., Sugözü B., Usage of powder pinus brutia cone and colemanite combination in brake friction composites as friction modifier, In *Materials Today: Proceedings* 27, 2072–2075, 2019.
- Kchaou M., Kuş R., Singaravelu D.L., Design, characterization, and performance analysis of Miscanthus fiber reinforced composite for brake application, *Journal of Engineering Research* 9 (3), 222–234, 2021.
- Maleque M., Atiqah, A., Talib R., Zahurin H., New natural fibre reinforced aluminium composite for automotive brake pad, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering* 7, 166–170, 2012.
- MAPEG, 2022. <https://www.mapeg.gov.tr/Custom/Madenistatistik> / (Erişim Tarihi: 21.12.2022).



- Persson B. N. J., Theory of friction- the role of elasticity in boundary lubrication, *Physical Review B* 50 (7), 4771–4786, 1994.
- Pujari S., Srikanth S., Experimental investigations on wear properties of palm kernel reinforced composites for brake pad applications, *Defence Technology* 15 (3), 295–299, 2019.
- Singh T., Pruncu C. I., Gangil B., Singh V., Fekete G., Comparative performance assessment of pineapple and kevlar fibers based friction composites, *Journal of Materials Research and Technology* 9 (2), 1491–1499, 2020.
- Stachowiak G. W., Batchelor A. W., *Engineering Tribology*, Butterworth-Heinemann, 883s, USA, 2014.
- Stadler Z., Krnel K., Kosmac T., Friction behavior of sintered metallic brake pads on a C/C-SiC composite brake disc, *Journal of the European Ceramic Society* 27, 1411–1417, 2007.
- Sugözü B., Nano silika, nano alümina ve nano zirkon aşındırıcı parçacık katkısının fren balata özelliklerine etkisi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (Basılmış), 2016.
- Sugözü B., Sugözü İ., Investigation of the use of a new binder material in automotive brake pad, *International Journal of Automotive Science and Technology* 4(4), 258–263, 2020.
- Tabor D., Friction as a dissipated process, friction of organic polymers in fundamentals of friction, *Macroscopic and Microscopic Processes* 3, 220, 1996.
- Timur M., Kılıç H., Marble waste using produced of automotive brake pad of friction coefficient different pad brake pads with compression, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences* 19(1), 10–14, 2013.
- Toyota, 2022. <https://blog.toyota.com.tr/fren-balatasi-nedir-ne-zaman-degistirilir/> (Erişim Tarihi: 28.12.2022).
- TS 555, Karayolu taşıtları–fren sistemleri–sürtünmeli frenler için balatalar, TSE, 2019.
- TÜİK, 2022. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Kasim-2022-45714/> (Erişim Tarihi: 22.12.2022).
- Yavuz H., Bayrakçeken H., Friction and wear characteristics of brake friction materials obtained from fiber and huntite blends, *Industrial Lubrication and Tribology* 74(7), 844–852, 2022.

---

Araştırma Makalesi / Research Article

---

**Investigation of Numerical Methods SPH, ALE, Coupled MM-ALE with LBE and CONWEP Empirical method for Simulation of the Spherical Free Air Blast Loading with Using LS Dyna**

İbrahim SAVRUKOĞLU<sup>1\*</sup>, Kubilay ASLANTAŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3969-0884>, [ibrahimsavrukoglu@gmail.com](mailto:ibrahimsavrukoglu@gmail.com)

<sup>2</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4558-4516>, [aslantas@aku.edu.tr](mailto:aslantas@aku.edu.tr)

Geliş/ Received: 18.11.2022;

Kabul / Accepted: 20.01.2023

**ABSTRACT:** Different simulation methods can be used to model the response of structures to the effects of blast loading. While some simulation methods are based on empirical blast loading principles, other methods use a fluid structure interaction algorithm to predict post-explosion shock waves and their physical effects. In this study, CONWEP, SPH, ALE, and coupled MM-ALE with LBE numerical methods were compared against each other according to results from an experimental study. Each method was compared with the test results in terms of solution time, convergence, and the use for different explosive types and environments. According to this comparison, it was concluded that empirical methods can be used for more limited environmental conditions and blast types, ALE numerical methods can give very sensitive results even in different solution sets but the solution time is long. Meanwhile in SPH method, the interaction of the air and blast shock cannot be fully modelled. According to the results of the study, the hybrid method is consistent with the test results in terms of peak pressure with a deviation of 7.44% at P1 and 2.29% at P2 under spherical free air blast loading conditions. However, since the effects of reflected pressure cannot be modelled exactly in the hybrid method, the ALE method should be preferred in cases with more complex geometries.

**Keywords:** Free Air Blast, Numerical Simulation, Explosion, Spherical Blast Load, High Explosive.

---

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: [ibrahimsavrukoglu@gmail.com](mailto:ibrahimsavrukoglu@gmail.com)

Bu makaleye atf yapmak için /To cite this article

Savrukoğlu, İ., Aslantaş, K., (2023). Investigation of Numerical Methods SPH, ALE, Coupled MM-ALE with LBE and CONWEP Empirical method for Simulation of the Spherical Free Air Blast Loading with Using LS Dyna. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 64-86.

**Table 1.** Nomenclature and abbreviations

Term	Definition	Units
CONWEP	Conventional Weapons Program	
SPH	Smooth Particle Hydrodynamics	
ALE	Arbitrary Lagrangian Eulerian	
MM-ALE	Multimaterial Ale	
LBE	Load Blast Enhanced	
TNT	Trinitrotoluene	
UFC-3-340-02	Structures To Resist The Effects Of Accidental Explosions	
$p_0$	Ambient Pressure	
$p_{so,max}$	Peak Overpressure	<i>kPa</i>
$td$	Positive Phase Duration	s
$so$	Incoming Pressure Values	subscript
$p_{so,min}$	A Negative Shock Front With A Peak Amplitude	<i>kPa</i>
$t\bar{d}$	Negative Phase Duration	
$Z$	Scaled Distance	$m/kg^{1/3}$ .
$p_r(t)$	Static pressure at any time for Friedlander Equation	<i>kPa</i>
$q_0$	Dynamic Pressure	<i>kPa</i>
$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$	Constants for ideal gases	
$\rho$ and $\rho_0$	Current and reference state densities for air	$kg/m^3$
$p$	Function of, the internal energy of air	<i>J</i>
$\gamma$	Specific heat ratio	
$E$	Specific internal energy	$kJ/kg$
$D$	Detonation velocity	$m/s$
$PCJ$	Chapman-Jouguet pressure	<i>kPa</i>
A, B	Linear coefficients	
R1, R2 and $\omega$	Nonlinear coefficients	
$V = v/v_0$	The volume of detonation products / volumes of undetonated High Explosive	
P	Pressure	<i>kPa</i>
E	Detonation energy per unit volume of the high explosive	<i>J</i>

## 1. INTRODUCTION

Air blast loadings should be taken into account at the design stage to minimize the damage to structures, people, or vehicles in case of terrorist attacks, defence needs of countries, or explosion-related accidents. Briefly; an explosion is an event that usually occurs with a sudden increase in temperature and gas release, causing rapid volume expand and the release of extremely high energy, accompanied by a very loud sound. From the centre of the explosive, the air creates a pressure increase. This pressure change causes a pressure distribution called shock wave. In order to investigate and model the effects of the blast loads on the structures, it is necessary to estimate the shock wave parameters according to the explosive type, amount and the environment in which the explosive is located. Experimental estimation of the blast load is costly and requires long processes. Numerical calculation methods are promising and frequently used calculation methods in modelling blast loads and structures exposed to blast loads.

Numerous studies have been conducted on the numerical calculation of the free air blast and the comparison of various methodologies. In a study by Zakrisson et al., numerical and experimental studies were carried out on two different scenarios. The first of these scenarios is the research in

which a cylindrical NSP 71 explosive is detonated in a steel pot and the other is the study in which a cylindrical NSP 71 explosive is detonated in free air. Zakrisson et al. modelled the test systems with the empirical explosion loading method, also known as CONWEP, and the ALE Multimaterial group. Apart from the two-dimensional modelling, they were also solved in 3D using the mapping method with Cartesian mesh. Simulation and experimental results were compared in terms of impulse and deflection on the target plate. According to the results of the research, the plate displacement was estimated with a deviation of 9.4-11.1%, and the deviation in the total impulse was calculated as only 1.0-1.6% in the solution calculated using the ALE method (Zakrisson et al., 2011). Another research conducted by Tabatabaei and Volz compared the LBE, MM-ALE, coupled MM-ALE with LBE methods, in which a 36 kg TNT explosive was placed at a standoff distance of 168 cm from the target concrete panel (Tabatabaei and Volz, 2012). The Cartesian mesh was applied in all numerical models, and no mesh sensitivity analysis was performed in this study. The results of the two sensors measuring the reflected pressure and the free air pressure were compared in terms of peak pressure values and solution times. It was observed that in coupled method results at the sensor, for which the free air pressure was calculated, largely overlapped with the test results, while the results of the reflected pressure calculation were found to be below the test results in all methods. Fichera et al. worked on the numerical modelling of explosions caused by landmines in the sand at different depths (Fichera, and Scapin, 2013). The pressure peak values formed at different altitudes in the air as a result of the explosion of 100 gr C4 explosive in a steel tube and sand environment simulated by the ALE method were compared with the experimental data. The other test system is the comparison of the pressures on the target plate in the air environment as a result of the explosion of 250 gr pentolite explosive underground in the sand. All cases in this research by Fichera et al. were simulations of blasts at different depths in a sand environment (Fichera and Scapin, 2013).

Trajkovski et al. performed a series of free air blast numerical simulations to investigate the effects of mesh size and bias parameters on the incident and reflected pressure values using the MM-ALE method (Trajkovskiet al., 2014). They also examined the effects of varying the standoff distance of the target from the explosive on the reflected pressure. Accordingly, reflected pressure parameters are negatively affected at distances less than 4 times the explosive diameter. Besides, they concluded that at least 10 elements are required across the explosive radius. Han and Liu, unlike the others, used the coupled MM-ALE method and compared the changes of incident pressures according to the scaled distance values in UFC 3-340-02 guideline with numerical results. It was concluded that the coupled MM-ALE method is useful in cases where the scaled distance is above 0.4, the problems that may arise from large air elements can be compensated by increasing the air density up to a certain rate, and larger air elements can be used in simulations where the scaled distance is relatively large (Han and Liu, 2015). Flis and Dobrociński, simulated hemispherical detonation waves on 1 kg of TNT detonated on a 1m x 1m steel plate on the ground plane with the numerical methods CONWEP, MM-ALE and SPH and concluded that the MMALE method is the only method that gives approximate results in contact explosions (Flis and Dobrociński, 2015). They observed that the CONWEP method could not generate detonation waves in the correct form in explosions that were closer than three times the charge radius and when the scaled distance was about  $1 \text{ m/kg}^{\frac{1}{3}}$ . Rebelo and Cismasiu modeled the free air blast on a 2.17m x 2.6 m steel plate from a standoff distance of 3 m with 8 kg TNT, using the numerical methods CONWEP, MM-ALE and combined MM-ALE by modelling in 2D and 3D (Rebelo and Cismasiu, 2017). The pressures of 10 different points, two on the lower surface of the part, two on the upper surface, and six in the explosive direction at different distances, were compared with the test results. They concluded that the pressures on the bottom surface of the

plate could not be obtained due to the lack of shading and focusing properties of the CONWEP method. In addition, it follows that the use of the 2D to 3D mapping method shortened the solution time considerably and the resolution precision was not impaired.

Different studies such as Erdik and Uçar's study also compared blast loading techniques by referencing Tabatatei and Volz's (2012) test design and findings (Erdik and Uçar, 2018). In terms of incident pressure and reflected peak pressure, the pressure waves created by the explosion of 34 kg of TNT over 1675 mm of a 1830x1830x165 mm steel plate were measured and estimated. In Erdik and Uçar's study, the hybrid technique was found to be effective when measured in terms of total solution time and accuracy when compared to CONWEP, ALE, and combined MM-ALE methods (Erdik and Uçar, 2018). Brief information regarding recent studies using numerical approaches to evaluate and calculate blast loads was provided. This study differs from previous studies in that it compares four alternative methodologies on the same experimental system and identifies crucial parameters for spherical free-air blast modelling. When the amount of explosive material detonates, it creates dense, high-pressure gases. The air surrounding the explosive is forced out from the centre of the explosion and compressed as a result of the explosion at supersonic speed. Because, the air is a compressible fluid, the pressure and density increase with a shock front up to a certain distance from the centre of the explosion and then return to the atmospheric conditions (Baker, 1974).

The blast wave is described by a rapid increase in air pressure from the ambient ( $p_0$ ) to the point of peak overpressure ( $p_{so,max}$ ) at a certain distance from the explosive. The pressure returns to ambient pressure in time ( $td$ ) known as the positive phase duration. The subscript "so" indicates incoming pressure values, that is, the pressure value measured by a pressure transducer just behind the shock front or parallel to the propagation of the shock front. Overpressure term is the pressure increased above normal atmospheric pressure which is inflicted by the blast wave (Rigby, 2014). After the positive phase, the negative phase period occurs due to the excessive expansion of the air. In the negative phase, a negative shock front with a peak amplitude  $p_{so,min}$  occurs during  $t\bar{d}$  below atmospheric pressure. At the end of the  $t\bar{d}$  period, the pressure returns to ambient pressure. An ideal free air blast pressure-time graph can be found in previous literature (Rigby, 2014), and is obtained by the time-dependent integration of the pressure change, that is, the area under the pulse pressure time curve. When a blast wave strikes a rigid surface, mass, momentum, and energy are conserved at the interface. As a result, the pressure, temperature, and density of the blast wave rise above their initial values. The reflected pressure is the overpressure at a rigid surface, and its values are shown by the subscript "r". It is assumed that the detonation effect varies within a certain rule with the mass of the explosive and the distance of the detonator from the target. The concept of scaled distance or cube root similarity rule was proposed at separate times and independently by Cranz and Hopkinson (Cranz, 1926), (Hopkinson, 1915); It reveals that there is a similarity between pressure, duration and impacts for explosives of different masses and explosives at certain distances from the target as described in a previous study (Rigby, 2014). For example, an explosion with mass  $W$  and distance  $R$  has similar explosion pressures at a distance  $KR$  with mass  $K^3W$ . The unit of scaled distance expressed as  $Z$  will be  $m / kg^{1/3}$ .

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

When the explosive diameter and the distance of the explosive to the target are  $K$  times; the explosive mass would be  $K^3$  times. In this case, the scaled distance  $Z$  does not change. However,  $ta$ ,

which is the time to reach the maximum pressure, and  $td$ , which is the time to fall from the maximum pressure to the ambient pressure, increase with  $K$  times. Therefore, the impulse also changes at the same rate linearly. The relationship between the coefficient  $K$ ,  $ta$ ,  $i$  and  $td$  is linear. According to UFC-3-340-02 guideline published by The United States Department of Defense “Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, 2008” (formerly known as TM-5 1300) for empirical estimation of blast load; where the scaled distance is the same, the maximum pressure and the reflected pressure are considered the same.

With regards to previous literature studies, the current study aims to determine the incident and reflected pressure values on the target as a result of blast waves in spherical waveforms of explosive charge. Comparisons of experimental data with the outcomes of numerical calculations were also taken into consideration in several investigations. This study's major goal is to compare the experimental findings from the same scenario with all of the numerical approaches that have been discussed in the literature for spherical free-air blast calculations. Numerical calculations and modelling carried out with using LS-DYNA commercial software with version of V.4.5.24.

## 2. MATERIALS AND METHODS

An explosion in free air can simply be expressed as a shock wave propagating outward from the centre of the explosive in a spherical form. Shock wave parameters can be obtained analytically by solving the conservation equations of momentum, mass, and energy on the explosive side and the free air side. Although the empirical method gives very fast and predictive results, numerical methods have been developed for situations involving complex structures and explosives. Euler elements are used for modelling compressible fluids such as air, and Lagrange-type elements in which the material moves with the nodes are used for target structures. Although the explosion event is modelled very precisely with these numerical methods, many parameters are needed. All these parameters are explained below. On the other hand, detailed information about test setup is given.

### 2.1 CONWEP (LBE) Method

The CONWEP method implemented in LS-DYNA is based on the empirical blast loading function based on TNT data from Kingery and Bulmash and the study of Randers-Pehrson and Bannister (Randers et al., 1997), (Zakrisson et al., 2011), (Kingery and Bulmash, 1984). This blast load, modelled with the \*LOAD\_BLAZT\_ENHANCED (LBE) calculation model in LS-DYNA, serves to simulate an explosion in a Lagrange structure without the need to model any Euler domain. Spherical or hemispherical blast loads can be simulated in the free-air blast environment. The load acts on a surface consisting of a set of predefined segments, such as solid elements or shell elements. The CONWEP method uses the Friedlander Equation (Eq.2) (Friedlander, 1946).

$$p_r(t) = p_{r,maxs} \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-b\frac{t}{t_d}} \quad (2)$$

Because high-order polynomial curve fitting is quite cumbersome, the estimation of shock wave parameters for spherical and TNT explosives by scaled distance is expressed by a series of curves which can be found in a previous study in the open literature (UFC 3-340-02, 2008). These curves also form the basis of the CONWEP computer code, which calculates the explosion parameters using the empirical method. It is also based on this work in the US Department of Defence (2008) Design Guide UFC-3-340-02 (Hyde, 1991).

For spherical TNT explosives, in cases where the explosive mass and the distance of the explosive to the target are known, the maximum pressure reflected pressure, impulse and  $ta$  and  $td$  graph on the graph in (UFC 3-340-02, 2008) correspond to the  $y$  value where the scaled distance value on the  $x$ -axis cuts the relevant curve. But the impulses,  $td$  and  $ta$  also depend on the cube root of the explosive mass. On the other hand, the pressure acting on the front side of the target could be found by using the data on variation of peak dynamic pressure versus peak incident pressure (UFC 3-340-02, 2008). When correlating the  $P_{so}$  value attained from to the  $x$ -axis of variation of peak dynamic pressure versus peak incident pressure, the dynamic pressure  $q_0$  will be the point that corresponds to the  $y$ -axis. Thus, the total pressure acting according to the drag coefficient of the target surface can be calculated. In LS-DYNA application of this method, the crucial card is LOAD BLAST ENHANCED which applies the LOS CONWEP pressure prediction to the surfaces in the model, taking into account the explosive mass and standoff distance.

## 2.2 Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) Method

The Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) method is a technique that examines the change of the particle over time, or in other words, follows the particle and uses Lagrangian equations in the solution. In shock wave problems particle methods are not only in the approximate solution of continuous fluid equations; states that it is a more fundamental approach than the continuity equations, which includes molecular dynamics systems in its infrastructure, revealing the difficult particle system equations. The SPH method can be used in solving hydrodynamic problems of field variables, which are generally in the form of partial differential equations. For this, firstly, the discretization of the domain of the problem, and then the field functions and the derivatives of these functions, these partial differential equations are converted into ordinary differential equations that depend only on time. Finally, these ordinary differential equations can be solved by any integration method.

Particles are randomly dispersed throughout the field without interconnection. An integral definition method (kernel approximation) is used to approximate the function valid in the domain. After the kernel approach, another approach using particles is made and this is called "particle approximation". In this step, the function and derivative values of the particles distributed in the area to be used in the definition of the integral are calculated by averaging the neighbourhoods of each particle at a certain distance. The particle approach is iterated at each time step, and the function values are updated at each step. The field variables functions, which are in the form of partial differential equations, turn into ordinary differential equations after the particle approximation. After this step, the solution of ordinary differential equations is done. One of the most important advantages here is that the solution can be made with the "explicit" integration algorithm. That is, in each step, the values obtained in the previous step are used to calculate the time variation of the field functions. In SPH method, the explosive is defined with the material model HIGH EXPLOSIVE BURN, the steel plate with the JOHNSON COOK material model, and the EOS of the explosive is defined with the JWL (JONES WILKINGS LEE) card. The AUTOMATIC NODES TO SURFACE card is used in modelling the contact between the particles and the steel plate surface. While the number of particles used in the SPH method directly affects the convergence of the result, there are also some important parameters. These;

SOFSCCL; Scale factor for constraint forces of soft constraint option

TSSFAC; Scale factor for the computed time step.

CSLH; Constant applied to the smoothing length of the particles.

### 2.3 Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) Method

Explosions involve high-pressure shock waves as well as liquid and gas flows. A Lagrangian finite element mesh is not always possible in the explosive charge region. The time step per iteration will be very small since the liquid-form elements around the explosive are severely deformed when the Lagrangian mesh structure is applied, which significantly increases the computation time. Also, there may be numerical approximation errors due to mesh distortions.

Frequently, fluid flow problems are determined using an Euler structure, but the need to accurately monitor material mixing and material interfaces can become huge and computationally takes a long time (Rigby, 2014). Also, Eulerian analysis usually requires a large number of elements (Hallquist, 2006). The Lagrangian method is the approach in which solids are represented. With the Lagrangian method, the nodes of the elements are connected to the material and do not separate from each other, they move together. When the material is deformed, the mesh also deforms with the material, but there is no mass transfer between the elements. Although the Lagrangian method is efficient in terms of calculation time and the ease of application of boundary conditions, the most common problem is the excessive deterioration of quality and the inability of analysis to converge at high deformations. In ALE method, an arbitrary reference coordinate system is created in addition to the Lagrange and Euler coordinate systems. With the following equation, the material derivative can be arranged according to the reference coordinates (Messahel and Soulie, 2013).

$$\frac{\partial f(X_i)}{\partial t} = \frac{\partial f(x_i)}{\partial t} + w_i \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \quad (3)$$

In equation 3,  $X_i$  is the Lagrangian coordinate,  $x_i$  is the Euler coordinate,  $w_i$  is the relative velocity. When we denote the velocity of the material by  $v$  and the velocity of the mesh by  $u$ , the relative velocity is  $w = v - u$

Thus, the basic equations for the ALE formulation are given by the following conservation equations:

Conservation of Mass;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + -w_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (4)$$

Conservation of Momentum;

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} + \rho b_i - \rho w_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

In equations 4 and 5,  $\sigma_{ij,j}$  is the stress tensor and is defined by,  $\sigma = -P.Id + \tau$ . Here  $\tau$  is the shear stress from the constitutive model and  $P$  is the pressure. For fluid and explosive gas, the pressure is calculated by an equation of state.

Conservation of Energy;

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = \sigma_{ij} v_{i,j} + \rho b_i v_i - \rho w_j \frac{\partial E}{\partial x_j} \quad (6)$$

In the Euler method,  $u = 0$  is taken since the net does not move. Therefore, the relative velocity  $w$  is equal to  $v$ , that is, the material velocity. In equation 6,  $\rho b_i v_i$  and  $\rho w_j \frac{\partial E}{\partial x_j}$  are expressed as advection terms. And it allows the material to move in the mesh (Messahel and Soulie, 2013). The ALE method allows the element nodes to move independently and randomly, allowing the elements



to deform without being warped even under high deformation so that the analysis converges and reaches the solution while maintaining the high-quality mesh during the analysis. The ALE method connects the mesh to the material as in the Lagrangian method but allows the mass transfer (the material to flow through the mesh) as in the Euler method. The computational steps are divided into the Lagrangian phase and the advection phase. The mesh structure can be advected to the original shape or a more advantageous shape. Or it may not be advected at all.

The \*MAT\_NULL material card with a combination of \*LINEAR\_POLYNOMIAL Equation of State card is used for modelling the ambient air. The pressure  $p$  is expressed as a function of, the internal energy of air, and  $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ , where  $\rho$  and  $\rho_0$  are the current and reference state densities, relatively (Rebelo and Cismasiu, 2017).

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (7)$$

In equation 7,  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  are constants and for ideal gases,  $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 0$  and  $C_4 = C_5 = \gamma - 1$  and the equation is reduced to the ideal gas equation of state.

$$p = (\gamma - 1)E\rho/\rho_0 \quad (8)$$

In Equation 8,  $\gamma$  is the specific heat ratio and  $E$  is the specific internal energy. The specific heat ratio is the ratio of the heat capacity at a constant temperature to the heat capacity at a constant volume. For air,  $\gamma = 1,4$ . The specific internal energy of  $E = 253,4 \text{ kJ/kg}$  gives an atmospheric pressure of  $101,36 \text{ kPa}$  (Rigby, 2014). While modeling the detonation process, the material model of the explosive and also the EOS should be determined. LS-DYNA typically uses MAT HIGH EXPLOSIVE BURN card, which requires the density of the explosive to be defined,  $\rho$ , detonation velocity,  $D$ , and Chapman-Jouguet pressure (PCJ). In the EOS\_JWL (Jones-Wilkins-Lee Equation of state), which is empirical, used for high explosives, the volume, pressure, and energy relationship of the explosive is defined as follows (Lee et al., 1968).

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (9)$$

In equation 9,  $A, B, R_1, R_2$  and  $\omega$  are constants,  $V$  is volume and  $E$  is internal energy. The parameters for air and Pentolite are shown in Table 2 with the JWL parameters.

Different from the SPH method, some characteristic cards are used in the ALE method to simulate an explosion in the LS-DYNA software. These;

ALE MULTI MATERIAL GROUPS; The keyword used to model the interaction between explosive and air elements also allows individual elements to contain more than one material (Luo et al., 2004).

CONSTRAINED LAGRANGE IN SOLID; defines fluid structure interactions.

CONTROL ALE; allows the addition of reference pressure to the free surfaces of the ALE, this keyword also allows the adjustment of various global parameters such as the advection method (meth), the number of cycles between advection (nadv) and the smoothing controls.

HOURLASS; Hourglass modes are non-physical, zero-energy modes that do not create any stress or strain but can affect solution accuracy. It is used to reduce the unreal deformation of elements in zero-energy modes.

MAT NULL; defines the material characteristics of the surrounding air.

LINEAR POLYNOMIAL; defines the equation of state parameters of the surrounding air.  
 EOS GRUNEISEN; defines the equation of state parameters of steel plate.

**Table 2.** ALE Parameters were used in this study (Schwer, 2016)

		MAT_NULL									
Air	$\rho_0$	1.225									
	EOS_LINEAR_POLYNOMIAL										
	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E_0$	$V_0$		
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0	2.55e-6	1		
		MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN									
Pentolite	$\rho_0$	$D$	$PCJ$								
	1650	7360	23.5								
		EOS_JWL									
	$A$	$B$	$R_1$	$R_2$	$w$	$E_0$	$V_0$				
	531.77	8.93	4.6	1.05	0.33	8	1				
		MAT_JOHNSON_COOK									
Mild Steel Plates (AS3678-250)	$\rho_0$	$G$	$E$	$PR$	$A$	$B$	$N$	$C$	$M$		
	7.850e-06	77	203	0.3	0.35	0.275	0.36	0.0022	1		
	$TM$	$TR$	$EPSO$	$CP$	$PC$	$SPALL$	IT	FMIN			
	1673	293	1	4400	-1000	1	1	1e-6			
		EOS_GRUNEISEN									
	$C$	$S1$	$S2$	$S3$	$GAMA0$	$A$	$E_0$	$VO$			
	4596	1.49	0	0	2.17	0.46	0	0			

## 2.4 Coupled MM-ALE with LBE Method

As described in the preceding section, empirical blast loads are applied to the air domain simulated with the MM-ALE formulation in this linked approach known as Coupled MM-ALE with LBE, which has significant benefits over using either methodology for air blast simulations (Slavik, 2009). The empirical method although computationally efficient is impractical if there is an obstacle to the shock wave between the explosive and the target, which may cause any shock wave reflection, or shock wave merging. In the empirical method, the blast energy focus resulting from shock wave merging or reflection is not considered. A relatively large air domain and a relatively fine mesh structure are required in the MM-ALE formulation. It causes high computational complexity than the CONWEP method (Rebelo and Cismasiu, 2017).

In this method, which is a combination of ALE and CONWEP methods, the air domain is modelled with the ALE formulation, while the pressure values caused by the explosion are applied to the ALE layer known as the ambient layer with the empirical formulation in the LOAD\_BLAST\_ENHANCED card. The blast wave propagates along the shock wave in the air domain modelled as ALE. Due to the usage of strong features of each model without modelling extensive air domains, Coupled MM-ALE with the LBE method can help to simulate shadowing and focusing. (Slavik, 2009).

The Coupled MM-ALE with the LBE solver's primary drawback is the extensive air domain that must often be included in the air blast model to prevent boundary effects. The necessity to use very fine mesh resolution to appropriately resolve the air shock adds to the huge domain's computing complexity (Slavik, 2009). Some special cards define this method as well.

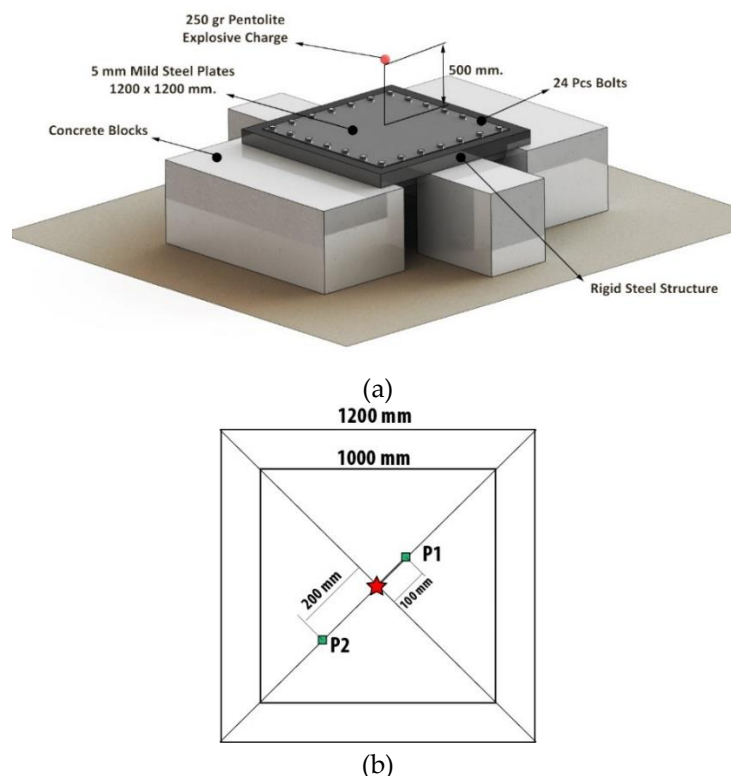
INITIAL VOLUME FRACTION GEOMETRY; lets you fill a volume with ALE multi-material groups.

ALE REFERENCE SYSTEM GROUP; helps to adjust the air domain and related parameters exposed to mesh expansion.

## 2.5 Test Descriptions

Explosion tests take place in a very short period, so the sensors and necessary hardware to be used need to be very sensitive. On the other hand, due to the difficulty of procuring the necessary explosive, academic studies in this field are also limited. For this reason, the experiments and results described below in the literature belongs to Boyd (2000) were used in this study. Experimental test report includes the test methodology, device specifications and the engineering parameters, that's why in this study the numerical results had been compared according to Boyd's (2000) test report's results.

A square target mild steel plate (AS3678-250) with one an edge of 1200 mm and a thickness of 5 mm is fixed to a more rigid heavy steel frame with 24 high tensile bolts with a pre-tensioned with 11.06 N.m. moment by Boyd shown in Figure 1a (Boyd, 2000). One of these experiments was carried out at a 500 mm standoff distance and 250 gr pentolite charge (E14). 100 mm of each side is fixed on the concrete block, and 1000 mm of the plate is left to move freely with the explosion load. Necessary sensors have been placed as can be seen in Figure 1b to record pressure, acceleration and displacement data. Boyd's (Boyd, 2000) experiments were performed with the help of the LS-Dyna program for numerical calculation with four different methods. SPH, ALE and Coupled MM-ALE with LBE methods were solved separately with different mesh sizes, and their results were compared in terms of mesh size and total computation time.



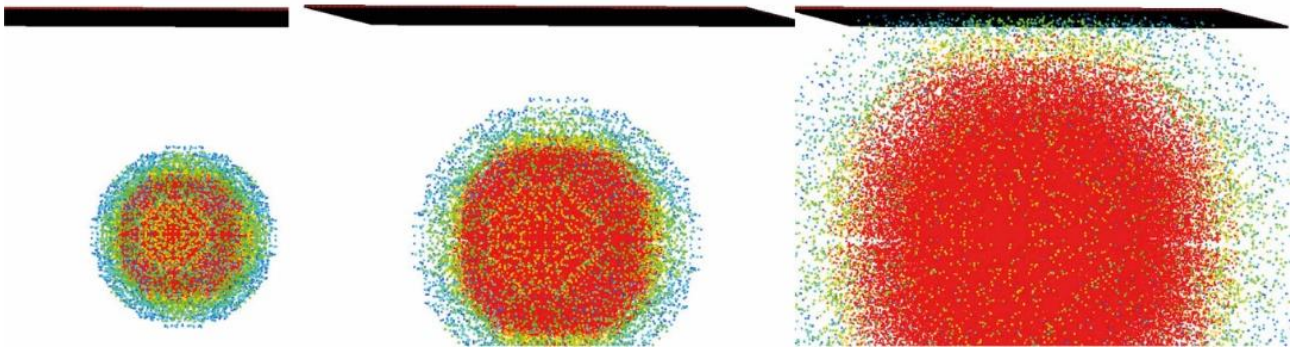
**Figure 1.** Experimental work showing (a) setup and instrumentation of Boyd's study and (b) scheme of points that are located on the plate for related sensors

According to Boyd's (2000) test number E14 the peak overpressure was measured 9.4 MPa at point P1 and 8.7 MPa at point P2.

## 2.6 Numerical Analysis

Boyd's experimental study with 250 gr PETN explosive was solved with LS-DYNA finite element software, using CONWEP, which solved the problem empirically, Coupled MM-ALE with LBE, which solved the problem semi-empirically, and ALE, which solved it completely numerically. SPH method uses hydrodynamic approaches which are generally in the form of partial differential equations (Boyd, 2000).

In SPH method, four different simulations were carried out with a different number of particles. The number of particles directly affects the convergence of the solution and also extends the solution time. The simulation was modelled with 2176, 8176, 137376 and 1114121 particles, respectively, and SOFSCCL=0.25, TSSFAC=0.001, and CSLH=1.2 were taken in these models. Figure 2 shows the schematic representation of the numerical model using the SPH method.



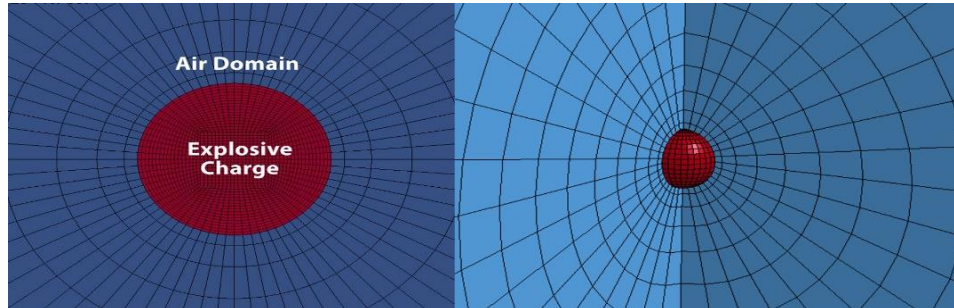
**Figure 2.** Scheme of SPH (Smooth Particle Method)

In the finite element method, since the physical quantities are transferred over the elements and nodes in the mesh structure, it is important to construct and select the mesh structure in order to model the shock wave propagation in spherical form. Therefore, it is important that the number of elements from the explosive core is so high that it can spread spherically and that it is arranged radially. For this reason, a preliminary study was carried out to create the mesh structure and according to the results of this first study, refinements were made in the regions under high pressure. Elements were enlarged from the explosive core to the air environment boundary using the bias method. Afterwards, different calculations were made by reducing the number of elements and the results were expected to converge. Considering the convergence of the results and the solution time, the optimum number of elements was determined for the convergent result.

To determine the mesh sensitivity for each method, different mesh structures were used, and the results were compared in Table 3. For coarse meshes in both types of calculation methods (ALE and Coupled MM-ALE with LBE) the approximate element size is chosen 25 mm. Especially in the ALE method, the mesh size must be chosen very small relative to the air domain. For instance, in this study, the minimum element size is 2.5 mm (in the condition of fine mesh) where the explosive diameter is 63 mm. If the same element size is chosen in the whole model the computation time will be extremely high likewise the total number of the element. Hence, the bias function was used in ALE and Coupled MM-ALE with LBE models to increase element size from the core of the explosion to the boundary of the air domain in direction of shock propagation. The bias function is used to adjust the spacing ratio of nodes along the edge. This function is very useful for FEM problems where the nodes need to be clustered intensively in a specific volume or area of the mesh structure.

All simulations were modelled in a 3D radial mesh structure in the Coupled MM-ALE with LBE and ALE methods, where explosives and fluids are defined by the Euler formulation. The shock

front formed by spherical explosives in the free air domain proceeds radially from the centre outward due to its nature. Since the shock waveform is distorted in Cartesian mesh structures, a structure in which the mesh size increases as a rule from the core to the outward with the radial mesh structure by using a bias feature is used. The air domain and the spherical explosive mesh are shown in Figure 3. The form of the shock wave in the analysis with radial and Cartesian mesh is given in Figure 4.

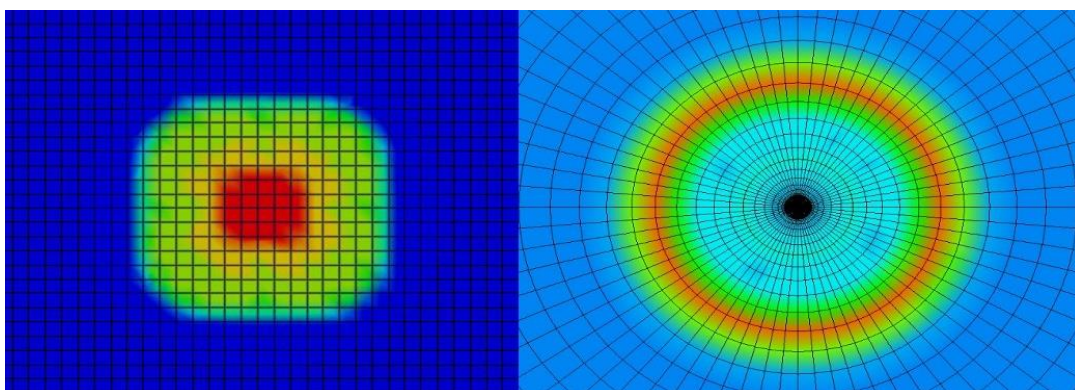


**Figure 3.** 3D radial mesh structure of explosive and air domain for ALE

As mentioned in the previous section, the CONWEP method works according to a mathematical expression developed as a result of controlled experiments. Since these controlled experiments are performed with TNT, they make a convergence with TNT equivalents in different types of explosives. However, it is not very useful for complex analyses because the velocity of detonation and the amount of energy released by each explosive is different. In addition, the CONWEP method offers an option only for spherical or hemispherical explosions. TNT equivalent for pentolite explosive was taken as 1.12 and calculations were made accordingly (Kingery and Coulter, 1983).

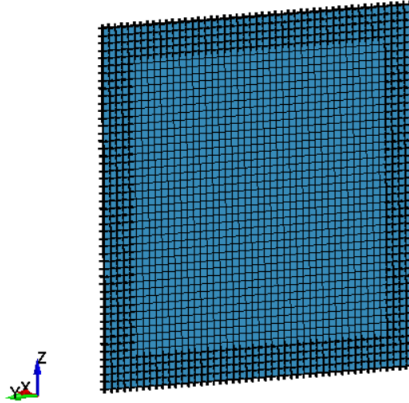
In the ALE method, the steel plate is modelled as Lagrange, and explosives and fluids as Euler-type elements. In this method, a large number of parameters are needed to estimate the blast physics. The parameters required for this study were obtained from the literature. The advantage of the ALE method is that it can be applied to all explosive types of different types and different geometries. The time interval between outputs is defined as 0.001 whereas the scale factor for the computed time steps is defined as 0.3.

In the solution with the Coupled MM-ALE with LBE method, the explosive is defined by the determination of the initial detonation point in the air domain by using a VOLUME FRACTION GEOMETRY card. The biggest advantage of this method is that it can produce solutions in a shorter time compared to the ALE method and can be applied to different types of explosives and geometries.



**Figure 4.** The difference in shock propagation between the cartesian and radial mesh.

On the other hand, the pressures acting on the monitoring points P1 and P2, on the target plate were estimated according to the UFC-3-340-02 guideline and are shown in Table 5. The scaled distance was calculated at  $0.78 \text{ m} / \text{kg}^{1/3}$  for points P1 and  $0.82 \text{ m} / \text{kg}^{1/3}$  for point P2. In the calculations for the front wall of the target, the  $c_d$  the coefficient was taken as 1 and the pressure acting on the relevant points was estimated (Karlos and Solomos, 2013).



**Figure 5.** Defining Boundary Conditions of the Plate

The steel plate had been stabled under steel flange that was bolted with 24 pieces high tensile bolts with 11.06 [N.m.] in the test set up. According to report it is emphasized that the target plate's 1000 mm square central area were free to move. Since there is no any information about the bolts types and locations, related region elements were assumed to be fixed elements in any direction. The movements of the elements in the 200 mm wide part surrounding the plate in the x, y, z, rx, ry and rz directions were fixed and the boundary conditions are determined (Figure 5).

### 2.7 Mesh Convergence Study

Mesh convergence was addressed in a series of calculations in which the element size was progressively reduced with a refinement ratio of 1.5 in the ALE method, 1.25 in the hybrid method, and 8 in the SPH method. In this study, the size of the square elements of the plate is taken as 12.5 mm. In addition, since the CONWEP algorithm doesn't use air media, there are no relations between mesh specifications and results. All the cases and methods to be solved are given in Table 3. At the same time, the results obtained with different mesh qualities were compared with the experimental results, and error rates were given. Relative error rates were calculated as below;

$$\varepsilon = \frac{\text{Calculated Value} - \text{Measured Value}}{\text{Measured Value}} \times 100 \quad (10)$$

Roache calculated the convergence rate based on three results with a certain refinement rate between mesh sizes as follows (Roache, 1998).

$$p = \log \left[ \frac{F_1 - F_3}{F_1 - F_2} \right] / \log(r) \quad (11)$$

Here  $F_i$  is the result of interest in different simulations and r is the mesh refinement ratio. When the results of the three different methods are compared, there is an asymptotic convergence. The following equation is used to obtain the convergence point (Roache, 1998).

$$F_0 = F_1 + (F_1 - F_2) / (r^p - 1) \quad (12)$$

Here,  $F_0$  indicates the point at which the analysis will converge. The mesh convergence analysis obtained for the three methods is given in Table 4. Mesh convergence analysis was performed only for the P1 point results.

**Table 3.** Comparative results of ALE coupled MM-ALE with LBE methods with a different number of elements.

Method	Mesh Number	Number of Elements / Particles	Approximate Mesh Sizes	CPU time	Calculated Average Peak Pressure at P1	$\varepsilon$ -Relative Errors for P1 (%)
ALE	1	158256	2.5 mm to 250 mm (bias)	21467 seconds	~13.4 MPa	43%
ALE	2	106651	3.7 mm to 250 mm (bias)	19245 seconds	~14.5 MPa	54%
ALE	3	92340	4 mm to 250 mm (bias)	18831 seconds	~14.9 MPa	59%
ALE	4	16301	5,5 mm to 250 mm (bias)	12305 seconds	~17.2 MPa	83%
COUPLED MM-ALE	1	4098304	12.5 mm	19112 seconds	~8.7 MPa	-7%
COUPLED MM-ALE	2	3235912	16 mm	13456 seconds	~8.1 MPa	-14%
COUPLED MM-ALE	3	2983506	20 mm	11304 seconds	~6.9 MPa	-27%
COUPLED MM-ALE	4	514304	25 mm	8306 seconds	~5.1 MPa	-46%
SPH	1	1114121	12.5 mm (Target Plate)	82379 seconds	~19.1 MPa	103%
SPH	2	137376	12.5 mm (Target Plate)	34521 seconds	~22.5 MPa	139%
SPH	3	8176	12.5 mm (Target Plate)	7884 seconds	~29.4 MPa	213%
SPH	4	2176	12.5 mm (Target Plate)	2905 seconds	~35.2 MPa	274%

**Table 4.** Mesh convergence study for three methods

Method	Refinement Ratio	Converged Number of Elements / Particles	Converged Mesh Sizes	Converged Peak Pressure at P1	Convergence Errors for P1 (%)
ALE	1.5	-	1.6 mm	~12.95 MPa	7.64%
COUPLED MM-ALE	1.25	-	10.5 mm	~9.1 MPa	4.39%
SPH	8	379820	-	~17.42 MPa	9.64%

Element sizes and numbers that can be used in the numerical modelling to be done in the next stage are given in Table 3. Since the convergence error rates are less than 10% and the increase in the number of elements will increase the CPU time, the experimental comparison has been made with the simulations with the smallest element sizes.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The results of four different methods with finer mesh sizes and the empirically calculated results with the help of the UFC-3-340-02 guideline are compared with the results of Boyd's (Boyd, 2000) experimental study in Table 5.

Although the decrease in mesh size in the ALE and Coupled MM-ALE with LBE methods increases the calculation time, it is seen that the calculated pressures converge to the experimental results. The plate was used as low-carbon steel (AS3678-250) in the test system. The plate is exposed to vibration as a result of the deflection of the plate with the blast pressure. Therefore, in the data read by a pressure transducer fixed on the part, the pressure is in a fluctuating form as a result of the acceleration acting on the part. For this reason, cases where the part is considered rigid give more clean results in terms of peak pressures acting on the relevant points. Relevant diagrams for cases where the plate is considered rigid are given in Figure 6 and 8. In cases where the plate is considered

elastic, the pressure acting on the part causes accelerations and deflections and are given in Figure 7. This causes fluctuations in the values of the pressure sensor fixed on the plate. The peak pressure at P1 and P2 points and time graphs are given in Figure 7 for comparison with test data.

**Table 5.** Comparative results of CONWEP, ALE, Coupled MM-ALE and SPH methods and experimental study.

Method	Explosive Charge	Calculated Average Peak Pressure at P1	Error Rates According to Experimental Results at P1	Calculated Average Peak Pressure at P2	Error Rates According to Experimental Results at P2
E14 Experiment	250 gr Pentolite	9.4 MPa	-	8.7 MPa	-
UFC-3-340-02 (UFC 3-340-02, 2008)	280 gr TNT	6.4 MPa	31.91%	5.8 MPa	33.34%
CONWEP	280 gr TNT	~9.6 MPa	2.12%	~7.8 MPa	10.34%
ALE	250 gr Pentolite	~13.4 MPa	42.55%	~9.1 MPa	4.59%
COUPLED MM-ALE	250 gr Pentolite	~8.7 MPa	7.44%	~8.5 MPa	2.29%
SPH	250 gr Pentolite	~19.1 MPa	103.19%	~16.3 MPa	87.35%

When the results were examined, the CONWEP method gave the most approximate results considering the calculation time and the calculated pressures. However, as the CONWEP method uses TNT data, there is a time shift with respect to the test data as can be seen in Figure 6a and Figure 6b. This is because the TNT detonation velocity is higher than the pentolite detonation velocity.

With the decrease in element size, the peak pressure values in the ALE and SPH methods decrease and converge to the required value, while there is an inverse relationship in the hybrid method. The reason for this is that the pressure wave that occurs as a result of the explosion in the hybrid method is modelled as a rapid volume expansion in the fluid media. The pressure increase as a result of this expansion is carried over the Euler elements by the advection method.

When all the results are considered, it is observed that the hybrid method gives the most reliable results in free air blast loading due to the solution time and more overlap with the experimental results. In the ALE method, considering the mesh convergence analysis, it is seen that the peak pressure at the P1 point will converge at 12.95 MPa. According to this result, an error of 37.7% is calculated. Element size needs to be reduced for both air elements and explosive elements for more sensitive solutions. In the solutions made by the SPH method, it is observed that the solution will converge at 17.42 MPa, thus creating an 85% error rate. Although the pressures calculated at both P1 and P2 points in the SPH method are considerably higher than the test values, the accuracy increases with the increase in the number of particles. On the other hand, the time of the pressure wave reaching the relevant points coincides with the test data.

It is observed that the slope of the pressure from the beginning to the peak is less than the test data in ALE and SPH methods. This is due to the dimensions of the air elements at the point of contact of the pressure with the plate. To shorten the total solution time, the element dimensions are increased with the bias function starting from the center of the explosive. The size of the air elements at the point of contact is relatively larger.

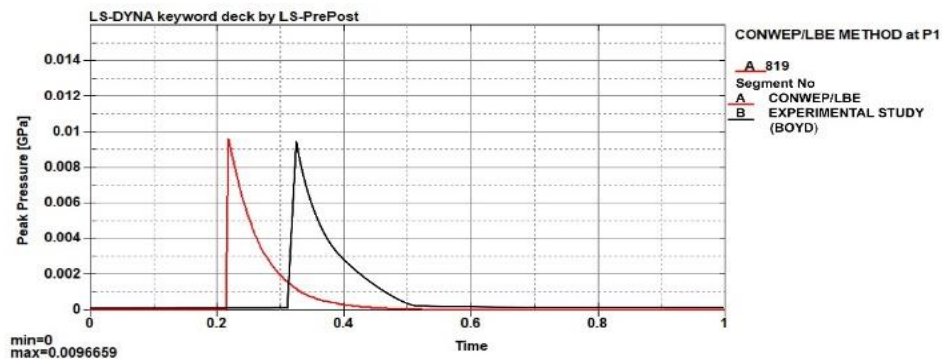
According to the results, the hybrid method has advantages over other methods in terms of both solution time and convergence in completely spherical free air burst loading cases. However, in complex geometries, the reflected pressure has a significant effect on the pressure acting on the target. The effect of reflected pressure cannot be modelled in the hybrid method. For this reason, as can be seen in Table 3, the peak pressure decreases as the element size decreases. In ALE and SPH methods, there is an inverse relationship between element size and peak pressure. Compared to other methods,



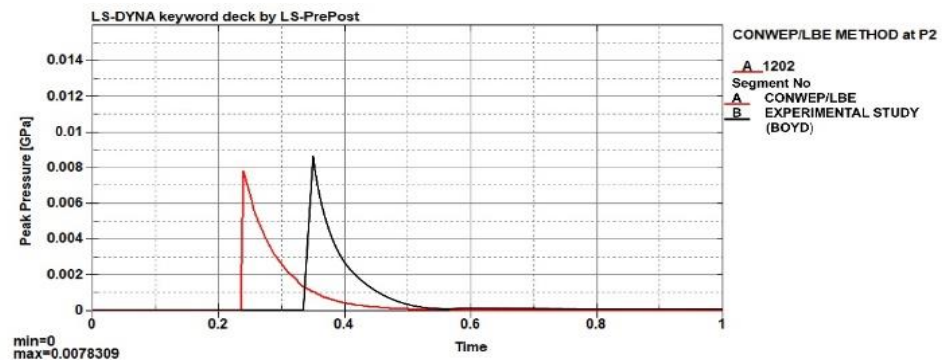
more fluctuations are observed in the SPH method. The reason for this is that the air domain is not modelled. The appropriate calculation method selection criteria for different scenarios are given in Table 6 below. Accordingly, criteria such as explosive geometry, fluid environment, solution time, explosive type, and modelling of shock wave parameters are the most important parameters for numerical design. In pressure transducers placed on the target plate, the vibration of the target causes fluctuations in the pressure values.

**Table 6.** Summary of selection criteria of CONWEP, ALE, Coupled MM-ALE and SPH methods and experimental study.

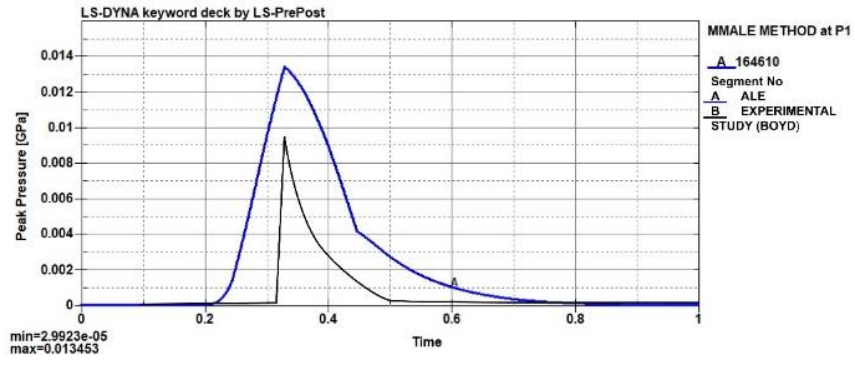
Method	Explosive Geometry	Type of Explosive	CPU Time	Modelling of Blast Shock Wave	Modelling of Blast Media
CONWEP	Spherical	TNT	Short	Not Possible	Not Possible
ALE	Any	Any	Extremely Long	Possible	Possible
COUPLED MM-ALE	Spherical	Any	Moderate	Possible	Possible
SPH	Any	Any	Moderate	Not Possible	Not Possible



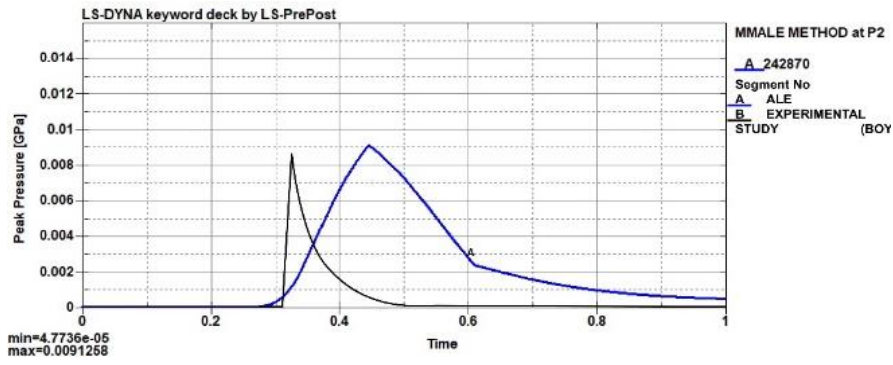
(a)



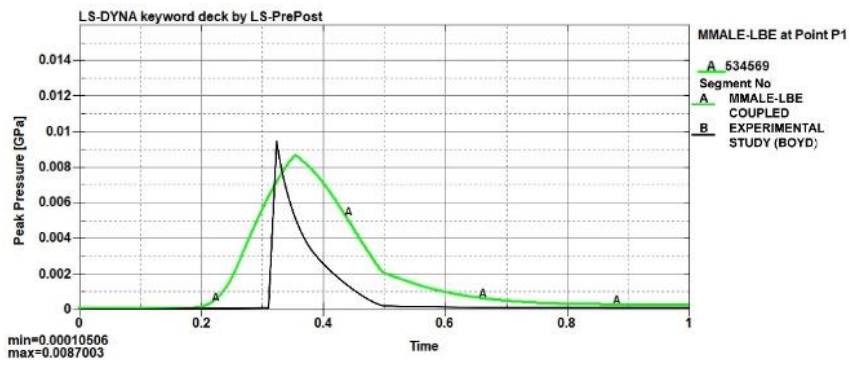
(b)



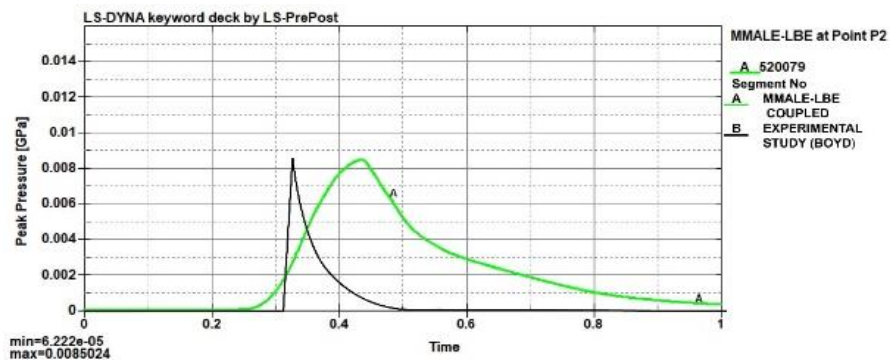
(c)



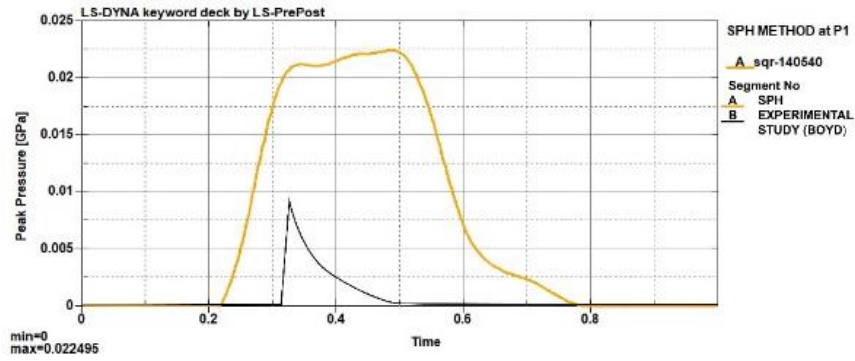
(d)



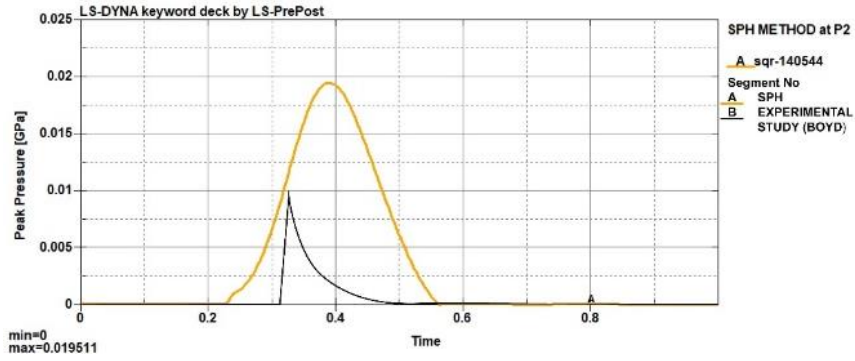
(e)



(f)

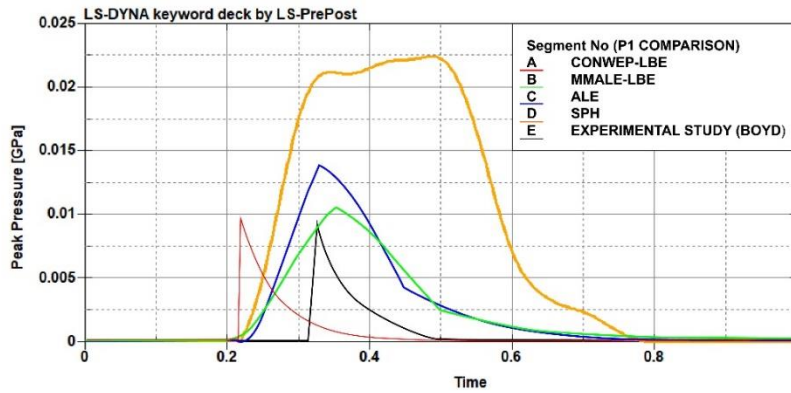


(g)

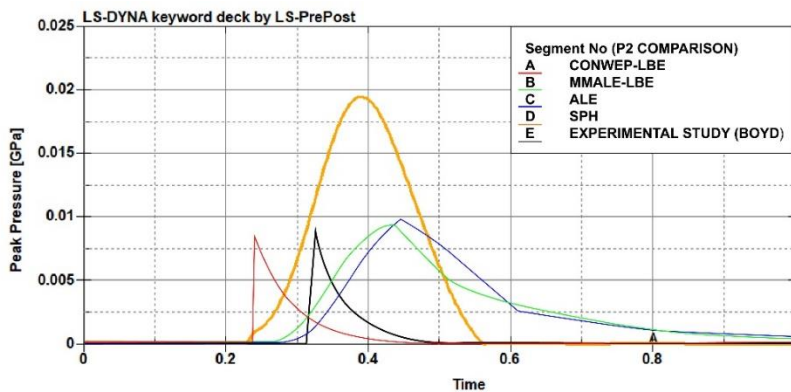


(h)

**Figure 6.** Peak pressure-time diagram at point P1 and P2 when the plate is considered rigid, obtained by the (a-b) CONWEP method (c-d) ALE method (e-f) coupled MM-ALE with LBE method (g-h) SPH method

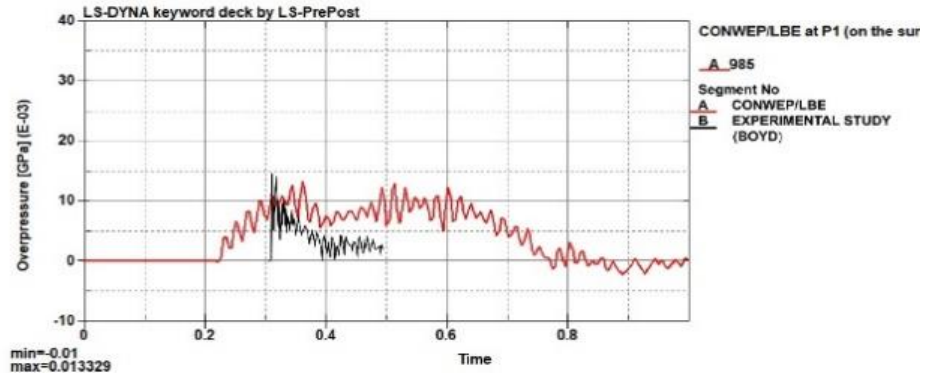


(a)

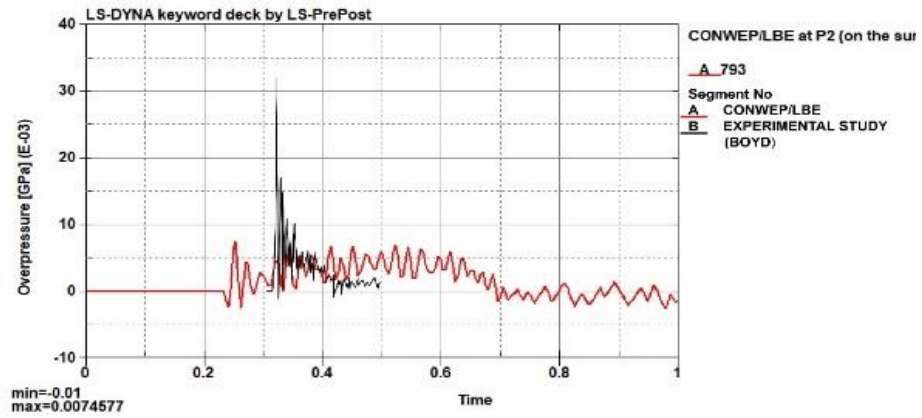


(b)

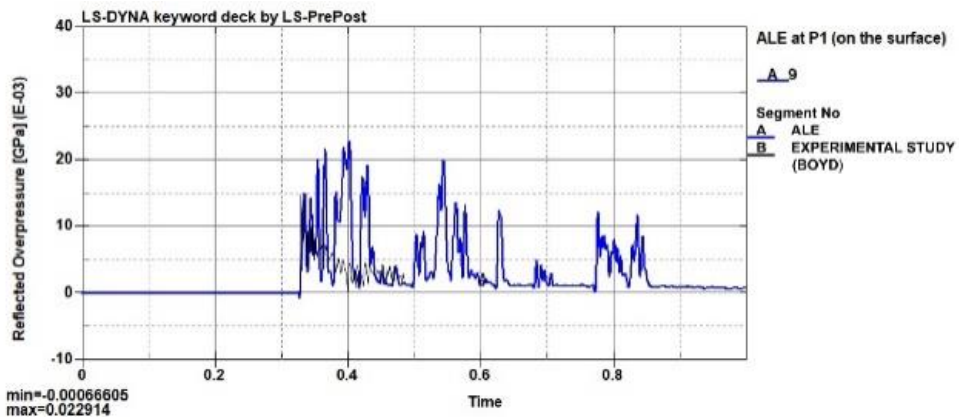
**Figure 7.** The peak pressure-time diagram at the (a) P1 and (b) P2 points obtained by different methods



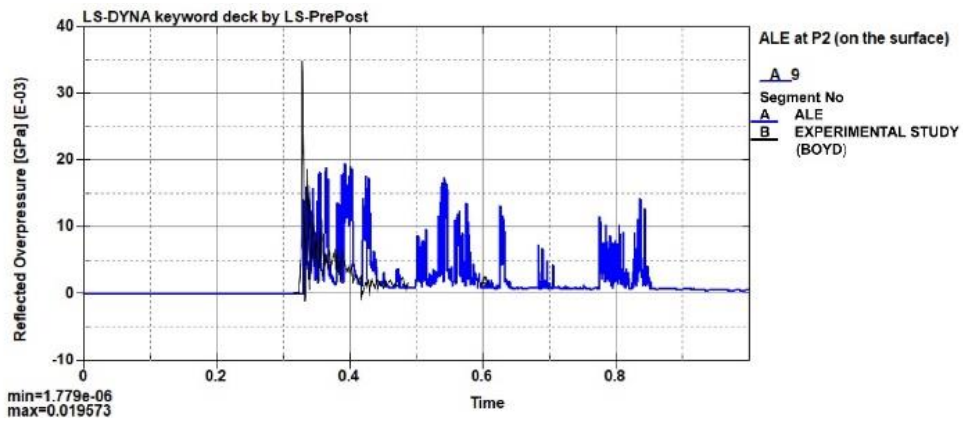
(a)



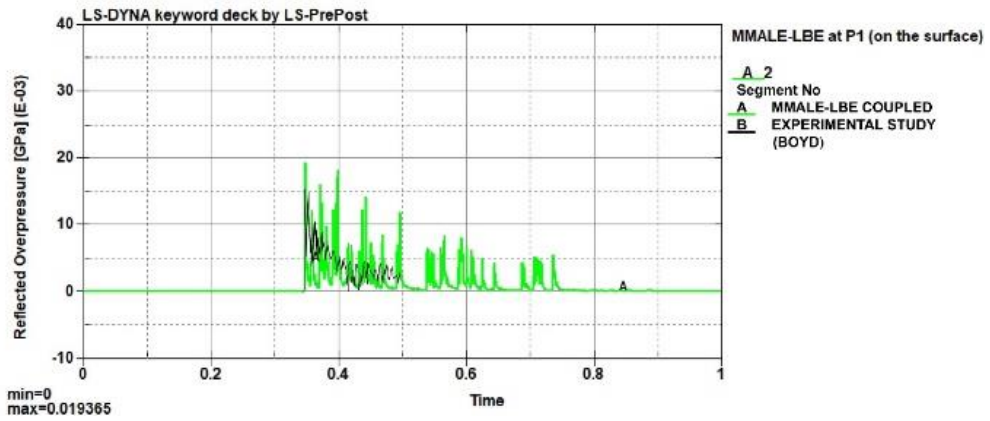
(b)



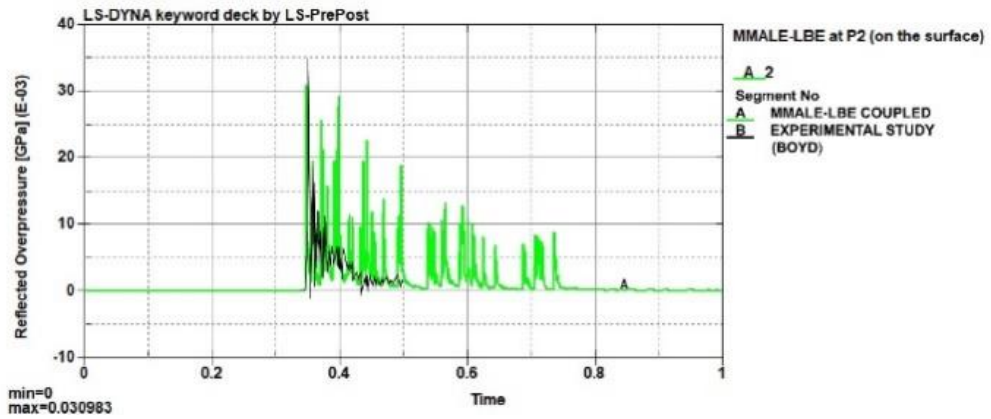
(c)



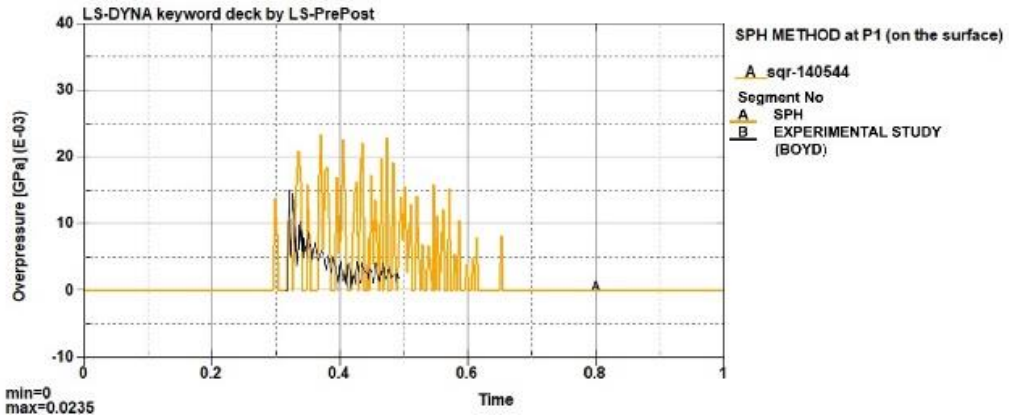
(d)



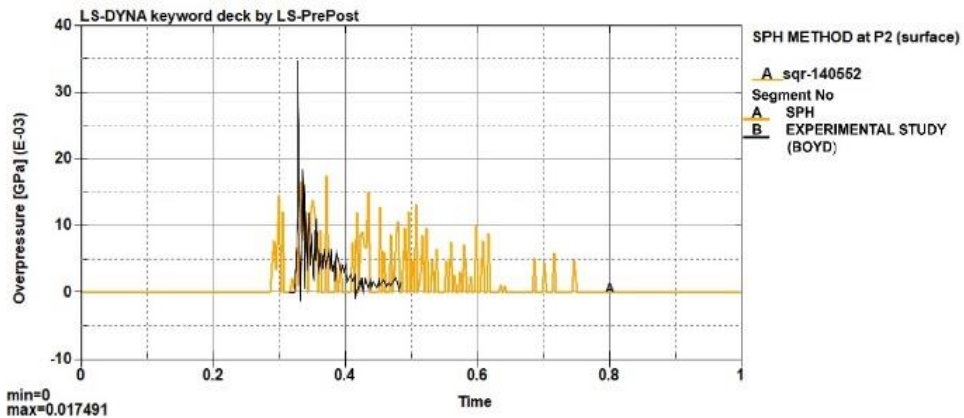
(e)



(f)



(g)



(h)

**Figure 8.** Peak pressure-time diagram at points P1 and P2, when the plate is considered elastic obtained by the (a-b) CONWEP method (c-d) ALE method (e-f) coupled MM-ALE with LBE method (g-h) SPH method

#### 4. CONCLUSION

In this study, Boyd's (Boyd, 2000) experimental work on the target steel plate at a certain distance under a spherical explosion load was tried to be verified by using different numerical methods. As a result of different calculations, the following conclusions were reached.

- Explosive type, geometry and ambient conditions may differ in real situations subject to blast load. Therefore, it is not correct to call a certain calculation method more reliable. Each method can be evaluated for analysis in different situations.
- Although the ALE method and hybrid methods are using same approach, spherical propagation of the waveform is mostly related with the both explosive and air domains mesh structure. In ALE method it is obtained that the excessive error rate caused by the mesh structure. Despite using the same parameters, the error rate in the hybrid method is quite low.
- In the literature, experimental studies have been exposed to structures exposed to spherical or hemispherical explosion loads. More experiments are needed for explosives of different geometries and different types, especially to accurately determine the necessary parameters in the ALE and COUPLED MM-ALE with LBE methods.
- Numerical methods present promising results, especially for mid-range blast charges where the scaled distance is between 0.4 and 1.
- In nonlinear analysis like blast loading, the scale factor for the computed time step must be defined below 0,67. Reducing this value increases the solution time and can be solved with different values to control the convergence of the solution.
- As the element size gets smaller, numerical methods give more accurate results. As the scaled distance decreases, the element size must also decrease.
- Compared to other methods, the SPH method can be used in preliminary design processes in terms of solution time and results. However, convergence studies should be done regarding the particle number and SOFSCL, TSSFAC, and CSLH parameters.

#### 5. CONFLICT OF INTEREST

Author(s) approve that to the best of their knowledge, there is not any conflict of interest or common interest with an institution/organization or a person that may affect the review process of the paper.

#### 6. AUTHOR CONTRIBUTION

Formal analysis, Ibrahim Savrukoğlu; Investigation, İbrahim Savrukoğlu and Kubilay Aslantaş; Data curation, Ibrahim Savrukoğlu; Writing-original draft, İbrahim Savrukoğlu and Kubilay Aslantaş.

#### 7. REFERENCES

- Baker W. E., 1974. Explosions in air., University of Texas Press, Austin, TX, USA., AMCP 706-181, 1-2.
- Boyd S.D., Acceleration of a plate subject to explosive blast loading-trial results, in, DTIC Document, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Melbourne, Victoria, Australia, 2, 2000.

- Cranz C., *Lehrbuch der Ballistik*, Springer, Berlin, Germany, 178, 1926.
- Erdik A., Uçar V., On evaluation and comparison of blast loading methods used in numerical simulations. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(5), 1385-1391, 2018.
- Fichera C., Peroni L., Scapin M., Numerical simulation of landmine explosions: comparison between different modelling approaches. In *COUPLED V: proceedings of the V International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering*: (pp. 708-719). CIMNE, 2013.
- Flis L., Dobrociński S., Numerical Simulations of Blast Loads from Near-Field Ground Explosions in Air. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 37. 11-17. 10.1515/sgem-2015-0040, 2015.
- Friedlander F. G., 'The diffraction of sound pulses. I. Diffraction by a semi-infinite plane', *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 186(1006), 322–344, 1946.
- Hallquist J. O., *LS-DYNA Theory Manual*, Livermore Software Technology Corporation, CA, USA, 17.1, 2006.
- Han Y., Liu H., Finite Element Simulation of Medium-Range Blast Loading Using LS-DYNA. *Shock and Vibration*. 2015. 1-9. 10.1155/2015/631493, 2015.
- Hopkinson B., *British Ordnance Board Minutes, Report 13565*, British Ordnance Office, London, UK, 11, 1915.
- Hyde D. W., *Conventional Weapons Program (CONWEP)*, U.S Army Waterways Experimental Station, Vicksburg, MS, USA, 18, 1991.
- Karlos V., Solomon G., Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components. 10.2788/61866, 2013.
- Kingery C., Bulmash G., Air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical burst, US Army Armament and Development Center, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland, 51, 1984.
- Kingery C., Coulter G., Tnt Equivalency of Pentolite Hemispheres, ARBRLTR-02456, Aberdeen, Maryland, 1983.
- Lee E. L., Hornig H. C., Kury J. W., Adiabatic expansion of high explosive detonation products, Technical Report TID 4500-UCRL 50422, Lawrence Radiation Laboratory, University of California, CA, USA, 2, 1968.
- Luo H., Baum J. D., Löhner R., On the computation of multi-material flows using ALE formulation, *Journal of Computational Physics* 194(1), 304–328, 2004.
- Messahel R., Soulie Y., SPH and ALE Formulations for Fluid Structure Coupling. *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 96, 2013.
- Randers-Pehrson G., Bannister K., Air blast Loading Model for DYNA2D and DYNA3D, DTIC Document, 13, 1997.
- Rebelo H. B., Cismasiu C., A Comparison between three air blast simulation techniques in LS-DYNA. In *11th European LS-DYNA Conference*, 2017.
- Rigby Sam., Blast wave clearing effects on finite-sized targets subjected to explosive loads, PhD Thesis, The Department of Civil and Structural Engineering at the University of Sheffield, Sheffield, 168, 2014.
- Roache P., *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*. Korkmaz K., Investigation and characterization of electrosark deposited chromium carbide-based coating on the steel. *Surface and Coatings Technology* 272(1), 1-7, 2015, 1998.

- Schwer L., A Brief Introduction to Coupling Load Blast Enhanced with Multi-Material ALE: The best of Both Worlds for Air Blast Simulation, 9th International LS-DYNA Forum, Bamberg, Germany, J-I-2, 2010.
- Schwer L., Jones-Wilkens-Lee (JWL) Equation of State with Afterburning, 14th International LS-DYNA User Conference, Constitutive Modeling, Detroit, USA, 1-29, 2016.
- Slavik T. P., A Coupling of Empirical Explosive Blast Loads to ALE Air Domains in LS-DYNA, 7th European LS-DYNA Conference, Salzburg, Austria, 10, 2009.
- Tabatabaei Z. S., Volz J. S., A comparison between three different blast methods in LS-DYNA: LBE, MM-ALE, Coupling of LBE and MM-ALE. In 12th International LS-DYNA Users Conference (pp. 1-10), 2012.
- Trajkovski J., Kunc R., Perenda J., Prebil I., Minimum mesh design criteria for blast wave development and structural response – MMALE method. Latin American Journal of Solids and Structures. 11. 1999. 10.1590/S1679-78252014001100006, 2014.
- UFC 3-340-02, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Department of the Army and Defense Special Weapons Agency, Washington, DC, USA, 2008.
- Zakrisson B., Wikman B., Häggblad H., Numerical simulations of blast loads and structural deformation from near-field explosions in air, International Journal of Impact Engineering. Volume 38, Issue 7, 597-612, 2011.
- Zakrisson B., Wikman B., Häggblad H.-Å., Numerical simulations of blast loads and structural deformation from near-field explosions in Air, International Journal of Impact Engineering, 38(7), pp. 597–612. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.02.005>, 2011.



Araştırma Makalesi / Research Article

Bazalt Elyaf Yüzeyindeki Silan Katmanının Polilaktit Kompozitlerine Güçlendirme Etkinliğinin Değerlendirilmesi

Ümit TAYFUN<sup>1</sup>, Çağrıalp ARSLAN<sup>2\*</sup>, Mehmet DOĞAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Bartın Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Temel Bilimler Bölümü, Bartın, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5978-5162>, utayfun@bartin.edu.tr

<sup>2</sup> Bartın Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5993-2983>, carslan@bartin.edu.tr

<sup>3</sup> Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9157-6504>, mehmetd@erciyes.edu.tr

Geliş/ Received: 19.12.2022;

Kabul / Accepted: 27.02.2023

**ÖZET:** Bazalt elyaf (BF) yüzeyindeki kaplamanın, kırılmış BF içeren polilaktid (PLA) kompozitlerin mekanik, ısıl-mekanik, eriyik akış ve morfolojik özelliklerine etkisi, çekme, darbe ve Shore sertlik testleri, dinamik mekanik analiz (DMA), eriyik akış indeksi (MFI) ölçümleri ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) karakterizasyon yöntemleri kullanılarak rapor edilmiştir. Kaplanmış ve kaplanmamış BF'nin yüzey özelliklerini araştırmak için kızılötesi spektroskopi analizi uygulanmıştır. Kompozit numuneler, eriyik karıştırma ve enjeksiyon kalıplama prosesi ile hazırlanmıştır. BF'nin PLA matrisine yüzey yapışmasının iyileştirilmesi, kaplanmış BF ve kaplanmamış BF içeren kompozitlerin mekanik test verilerinin karşılaştırılması yardımıyla değerlendirilmiştir. BF yüzeyindeki silan kaplama, kaplanmamış BF'ye kıyasla depolama modülü değerlerinde artışa neden olmuştur. Bunlara ek olarak, PLA'nın MFI değeri, BF eklenmesi ile ciddi bir değişiklik göstermemiştir. Kaplanmış BF ve PLA fazı arasındaki yapışmanın gerçekleştirilmesinden kaynaklanan performans artışı, kompozitlerin SEM mikrografları ile doğrulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Polilaktit, Bazalt Elyaf, Polimer Kompozitler, Yüzey Kaplaması.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: carslan@bartin.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Tayfun, Ü., Arslan, Ç., Doğan, M. (2023). Bazalt Elyaf Yüzeyindeki Silan Katmanının Polilaktit Kompozitlerine Güçlendirme Etkinliğinin Değerlendirilmesi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 87-99.

## Evaluating Reinforcement Effectiveness of Silane Layer on Basalt Fiber Surface to Its Composites with Polylactide

**ABSTRACT:** The effect of the covering layer on the basalt fiber (BF) surface on the mechanical, thermo-mechanical, melt-flow, and morphological properties of polylactide (PLA) composites loaded with chopped BF was reported by performing tensile, impact, and Shore hardness tests, dynamic mechanical analysis (DMA), melt flow index (MFI) measurements, and scanning electron microscopy (SEM) characterization methods. Infrared spectroscopy analysis was applied to investigate the surface characteristics of desized and sized BF. Composite specimens were prepared through the melt-compounding and injection molding processes. The improvement of BF surface adhesion to PLA matrix was evaluated by comparing mechanical test data of composites containing desized and sized BF. Silane covering on BF led to an increase in storage modulus values compared to desized BF. Furthermore, the MFI of PLA did not change significantly with BF inclusions. Performance enhancement caused by the establishment of adhesion between the BF and PLA phases was confirmed by SEM micrographs of composites.

**Keywords:** Polylactide, Basalt Fiber, Polymer Composites, Surface Sizing.

### 1. GİRİŞ

Polilaktit (PLA), doğal kaynaklardan üretilen, biyo-bozunur karakterde olduğundan çevreyle uyumlu harman üretim faaliyetlerinde kullanımı artan yeni nesil bir polimerdir. Son yıllarda PLA esaslı kompozitlerine performans iyileştirme odaklı çalışmalar hız kazanmıştır (Auras ve ark., 2004; Bajpai ve ark., 2014; Nagarajan ve ark., 2016; Rasal ve ark., 2010). PLA'nın biyolojik olarak parçalanarak bozunabilme özelliği çevre için uyumlu çeşitli ürünlerde kullanımını arttırmıştır. Yüksek mekanik dayanım, biyo-uyumluluk ve geleneksel teknikler ile pratik işlenebilme da dahil olmak üzere biyolojik olarak parçalanabilme özelliği PLA'nın en önemli avantajıdır (Dike, 2020; Hasan ve ark., 2020; Ilyas ve ark., 2022; Murariu ve Dubois, 2016; Siakeng ve ark., 2019). Öte yandan PLA'nın geniş aralıkta kullanımını kısıtlayan hidrofobik yapı, zayıf tokluk ve düşük bozunma oranı gibi bazı sınırlamalar mevcuttur. Bu yüzden PLA'nın endüstriyel uygulamalarda kullanımını genişletmek amacıyla performans iyileştirme çalışmaları devam etmektedir (Ahmad ve ark., 2015; Akampumuza ve ark., 2017; Chauhan ve ark., 2022). Bunlara ek olarak, doğal lif içeren PLA esaslı kompozitlerin eklemeli imalat uygulamalarında üç boyutlu yazıcı filamentleri olarak kullanımına dair çalışmalar da son yıllarda ivme kazanmıştır (Musa ve ark., 2022; Nasir ve ark., 2022, Sang ve ark., 2019; Torun ve ark., 2021).

Bazalt elyafı, bazalt kayaçlarının eritilmesiyle sürekli ve kısa formlarda üretilmektedir. BF, mineral kayaçtan elde edildiğinden bitkisel bir lif olmamasına rağmen doğal lif olarak sınıflandırılır. Bazalt elyafın ana üreticileri başlıca Rusya Federasyonu, Ukrayna, Çin, Norveç, İrlanda ve Almanya'dır (Gur'ev ve ark., 2001; Jamshaid ve Mishra, 2016; Ross, 2006). Bazalt elyaf (BF), yüksek mukavemeti sayesinde çoğuz harmanlarda (polimerik kompozitlerde) kullanımı gerek akademik çalışmalar gerekse endüstri uygulamalar bazında gün geçtikçe artan bir güçlendiricidir. BF, yüksek boy/çap ve yüzey alanı/hacim oranına sahip olduğundan, polimerik yapı içerisine eklendiğinde mekanik özelliklerde iyileşme sağlamaktadır. BF yüzeyine çoğuz ile uyumlu hale getirmek için kimyasal kaplama yöntemleri uygulanmaktadır (Dhand ve ark., 2015; Fiore ve ark., 2015; Khandelwal ve ark., 2020; Lilli ve ark., 2021; Singha, 2012).

Literatürde BF ile takviye edilmiş PLA esaslı kompozitlerin hazırlanması ve karakterizasyonuna yönelik birkaç araştırma yapılmıştır. Tabi ve ark. enjeksiyonla kalıplanmış uzun BF dolgulu PLA kompozitleri üretmiştir (Tabi ve ark., 2014). Liu ve ark. BF yüzeyine uygun yüzey işlemi uygulamışlar ve BF ile güçlendirilmiş PLA mekanik özelliklerinde iyileştirmeler saptamıştır (Liu ve ark., 2012). Kurniawan ve ark. plazma polimerizasyonu uygulanan BF yüzey sonuçlarını aktarmıştır. Plazma modifikasyonu, PLA/BF kompozitlerinin çekme dayanımında artışa neden olmuştur (Kurniawan ve ark., 2013). Kurniawan ve ark. başka bir çalışmalarında yüzeyi silanla kaplanmış BF ile güçlendirilmiş PLA kompozitlerinin yüksek mekanik özellikleri sergilediğini aktarmıştır (Kurniawan ve ark., 2015). Sbardella ve ark. BF yüzeyini çinkooksit ile modifiye ederek PLA ile elyaf arasında yüzeysel etkileşimi arttırmıştır (Sbardella ve ark., 2021). Chen ve ark. hazırladıkları PLA/BF kompozitlerinin sert doku onarım uygulamalarında kullanım potansiyeline sahip olduğunu öne sürmüşlerdir (Chen ve ark., 2010). Diğer bir çalışmada, PLA matrisi BF ve odun elyaf ile harmanlanarak, baskı kalıplama ile şekillendirilen kompozitlerin ısı ve ses yalıtım performansı incelenmiştir (Aykanat ve Ermeydan, 2022). Tabi ve ark. BF içeren PLA bazlı kompozitlerin uzun süreli kullanım gerektiren mühendislik uygulamalarında yapısal kullanım davranışlarını incelemiştir (Tabi ve ark., 2016).

Bu çalışmada yüzeyi kaplanmış ve kaplanmamış BF numuneleri, PLA ile eriyik karıştırma yöntemiyle kompozitler hazırlanmıştır. Test numuneleri enjeksiyon kalıplama işlemi kullanılarak hazırlanmıştır. BF'nin PLA matrisine yüzey yapışmasının iyileştirilmesi, kaplanmış BF ve kaplanmamış BF içeren kompozitlerin mekanik test sonuçlarının karşılaştırılması yapılarak ortaya konmuştur. BF ile güçlendirilmiş PLA esaslı kompozitlerin çekme dayanım, sertlik, darbe dayanım, ısıl mekanik, eriyik akış ve morfolojik davranışları tespit edilmiştir. Özellikle eriyik akış hızı sonuçları, PLA/BF kompozitlerin eklemeli imalat uygulamalarındaki işlem parametrelerini ortaya koymasından önem arz etmektedir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada polilaktit matris olarak Natureworks LLC firmasının Ingeo Biopolymer ticari isimli ürünü kullanılmıştır. Bazalt elyaf 6 mm boyunda kırılmış şekilde Tila Kompozit firmasından temin edilmiştir. Endüstriyel olarak silan kaplanmış şekilde alınan BF için her bir lif için elyaf çapı 13-20 µm aralığında olduğu üretici tarafından bildirilmiştir. Ticari olarak silan kaplanmış kısa BF numunesi 500 °C sıcaklıkta kül fırınında 2 saat bekletilerek, yüzey kaplaması kaldırılmıştır. Yüzey kaplaması kaldırılmış (D-BF) ve silan kaplamalı (S-BF) elyaf yüzeylerinin özelliklerini araştırmak için kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizi uygulanmıştır.

Kompozit hazırlama aşamasından önce PLA ve BF numuneleri 100 °C sıcaklıkta etüvde 2 saat süre boyunca bekletilerek, eklenti içerisindeki nem uzaklaştırılmıştır. Kompozit numuneler, eriyik karıştırma ve enjeksiyon kalıplama işlemleri ile hazırlanmıştır. D-BF ve S-BF, %20 sabit ağırlıkça yüzde oranında PLA ile laboratuvar ölçekli mikro-ekstruder (MC 15 HT, Xplore) kullanılarak karıştırılmıştır. Test numuneleri 7.4×2.1×80 mm<sup>3</sup> boyutlarında enjeksiyon kalıplama cihazı (Daca Instruments) ile şekillendirilmiştir. Kompozit hazırlama basamağında kullanılan işlem parametreleri Çizelge 1'de listelenmiştir.

**Çizelge 1.** Kompozit üretiminde kullanılan işlem parametreleri

<b>Parametre</b>	<b>Değer</b>	<b>Birim</b>
<b>Ekstrüzyon işlemi</b>		
Karıştırma sıcaklığı	200	°C
Karıştırma süresi	5	dakika
Karıştırma hızı	100	tur/dakika
<b>Enjeksiyonlu kalıplama işlemi</b>		
Hazne sıcaklığı	210	°C
Kalıp sıcaklığı	80	°C
Enjeksiyon basıncı	8	Bar
Kalıpta bekleme süresi	3	dakika

Kompozitlerin mekanik özellikleri, eriyik akış parametreleri, ısıl-mekanik özellikleri ve morfolojik davranışları sırasıyla çekme testi, erime akış indeksi (MFI) testi, dinamik mekanik analizi (DMA), ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Sertlik ölçümleri, her bir bileşim için en az 10 farklı ölçüm alınarak yapılmış olup, ortalama değerler alınarak kaydedilmiştir.

BF numunelerinin yüzey fonksiyonel özellikleri kızılötesi spektroskopisi (FTIR) yöntemiyle, Bruker Optics marka 66/S serisi cihaz kullanılarak karakterize edilmiştir.

Kompozitlerin çekme testleri, Lloyd LR 30 K çekme test cihazı kullanılarak ASTM D638 standardına göre 5 kN yük hücresi ve 5 cm/dk çekme hızı parametrelerinde yapılmıştır. Çekme mukavemeti, çekme modülü ve yüzde gerinim değerleri, her bir bileşim için en az beş numune test edilerek ve ortalama değerler alınarak kaydedilmiştir.

Kompozit numunelere darbe testi, ASTM D256 standart prosedürü kullanılarak 4J sarkaçlı Coesfeld marka darbe test cihazı kullanılarak uygulanmıştır. Her bir bileşim için en az beş numune test edilerek ve ortalama değerler alınarak kaydedilmiştir.

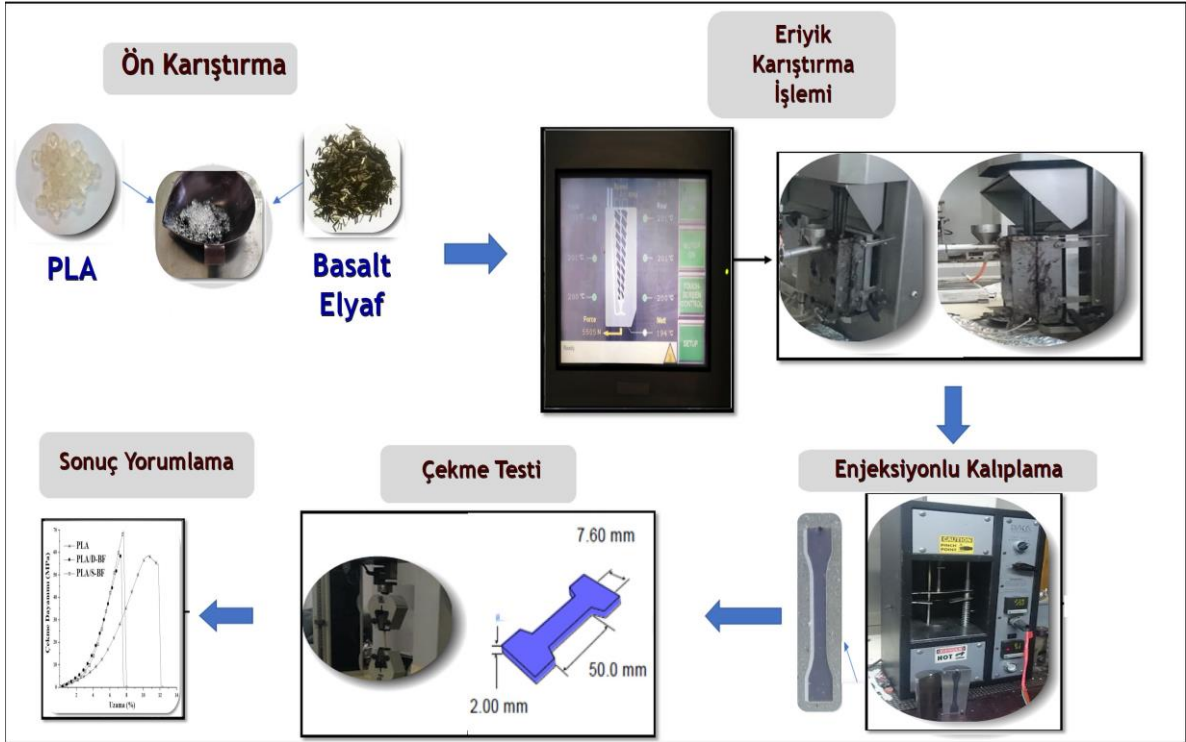
Kompozitlerin morfolojik yapılarını görüntülemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) tertip edilmiştir. Bu analizde, darbe testinden elde edilen kompozitlerin kırık yüzeyleri test öncesi altın ile kaplanarak, LEO 440 taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

PLA ve kompozitlerin Shore sertlik değerleri, Zwick R5LB041 dijital sertlik cihazı kullanılarak belirlenmiştir.

Eriyik akış hızları (MFI) ölçümleri, 210°C sıcaklıkta 5 kg standart yük kullanılarak Coesfeld Meltfixer LT cihazında gerçekleştirilmiştir.

Kompozitlerin ısıl-mekanik davranışlarını belirlemek amacıyla Perkin Elmer marka DMA 8000 model cihaz kullanılarak depolama ve kayıp modülleri ve tanδ parametrelerinin artan sıcaklığa göre değişimlerini gösteren eğrileri analiz edilmiştir. DMA ölçümleri, 1 Hz frekans, 0-150 °C sıcaklık aralığı ve 10 C/dak. ısıtma hızı uygulanarak ikili konsol bükme modunda gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın kompozit hazırlama ve şekillendirme basamaklarını da kapsayan görsel Şekil 1'de sunulmuştur.

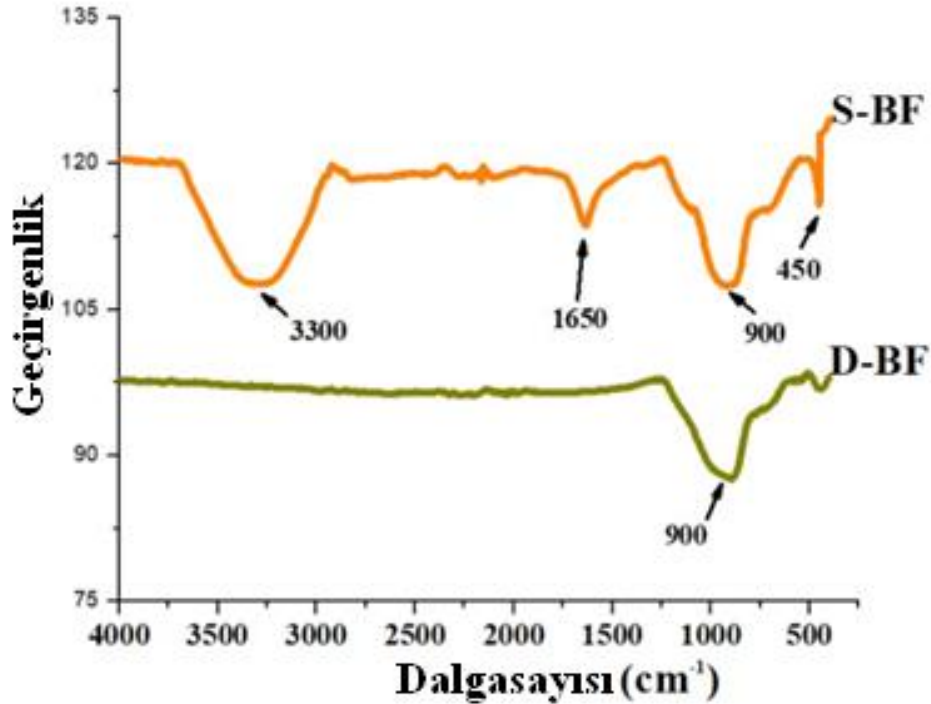


Şekil 1. Çalışmanın aşamalarını betimleyen şema

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1 Elyaf Yüzeyinin Karakterizasyonu

S-BF ve D-BF numunelerinin yüzeylerinin FTIR spektrumları Şekil 1’de paylaşılmıştır.



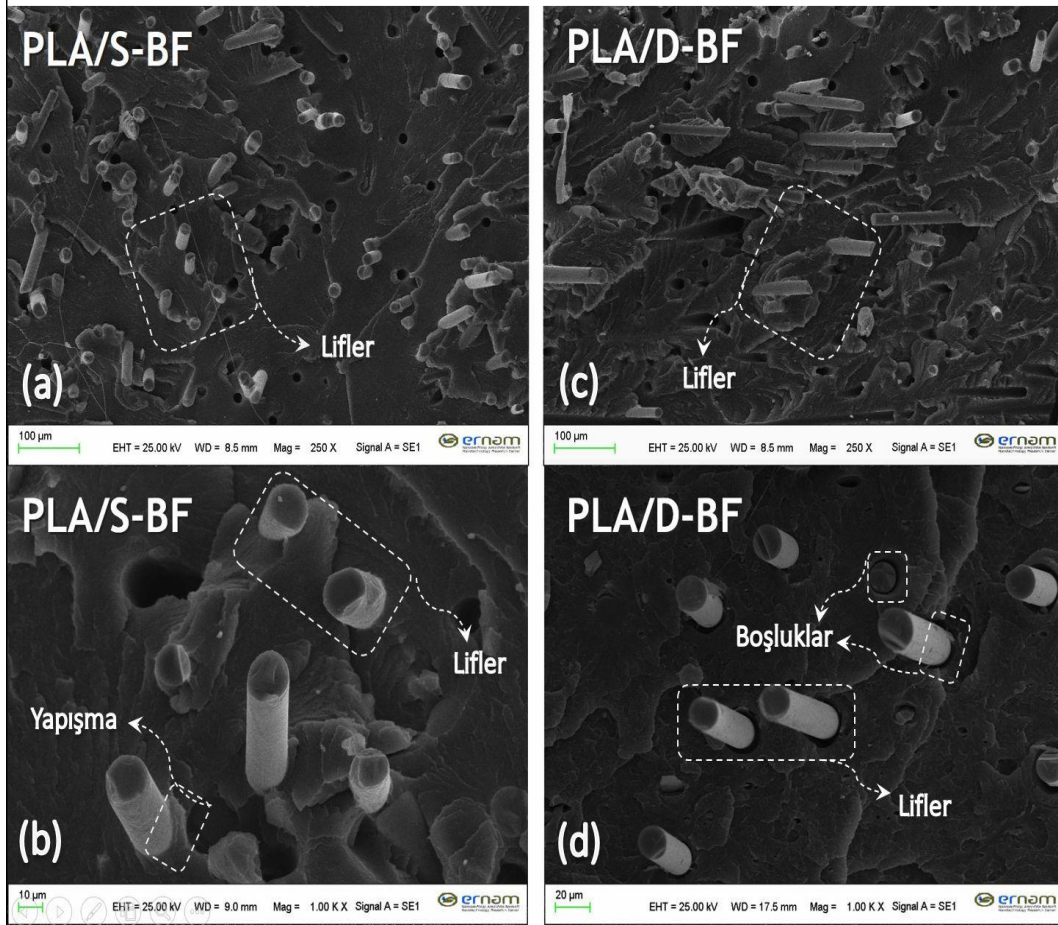
Şekil 2. Elyaf yüzeylerinin FTIR spektrumları

Şekil 2’de paylaşılan spektrumlarda  $900 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısında görülen karakteristik pik BF’ya aittir (Arslan ve Doğan, 2018). S-BF spektrumunda mevcut olup D-BF spektrumunda gözlenmeyen yaklaşık  $450$ ,  $1650$  ve  $3330 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısındaki pikler, sırasıyla Si–O gerilme, serbest N-H, C-H

germe titreşimlerinden kaynaklı olup BF yüzeyindeki amino-silan varlığını açıkça göstermektedir (Arslan ve Doğan, 2018; Chemtob ve ark., 2011; Paunikallio ve ark., 2008; Tayfun ve Doğan, 2022).

### 3.2 Kompozitlerin Morfolojisi

Kompozitlerin darbe testi sonucu kırılmış yüzeylerinin SEM mikro resimleri Şekil 3'te gösterilmiştir. BF ile güçlendirilmiş kompozitlerin kırılmış yüzeylerinin SEM mikro-grafikleri incelendiğinde, D-BF liflerinin PLA fazı içinde homojen dağılım göstermediği gözlenmiştir (Şekil 3c). PLA matrisi içerisinde D-BF'nin homojen dağılım göstermemesinin nedeni D-BF yüzeyinde polimer ile uyumlu fonksiyonel grup olmadığından PLA ile D-BF arasında güçlü yapışma gerçekleşmemesidir. PLA matrisi ile D-BF arasındaki uyumsuzluklardan ötürü oluşan boşluklar ve kopmalar PLA/D-BF kompozitlerinin SEM mikro-fotoğraflarında açıkça görülmektedir (Şekil 3d). S-BF ise PLA matrisi ile daha çok yüzey etkileşimine girerek kompozit yapısı içerisinde homojen olarak dağılmasını sağlamıştır (Şekil 3a). Buna ek olarak S-BF liflerinin etrafının PLA ile iyi yapışma sergilediği gözlenmektedir (Şekil 3b). SEM fotoğraflarında gözlemlenen yuvarlak boşluklar, deformasyon sırasında liflerin matris içerisinden çıkması nedeni ile oluşmuştur.



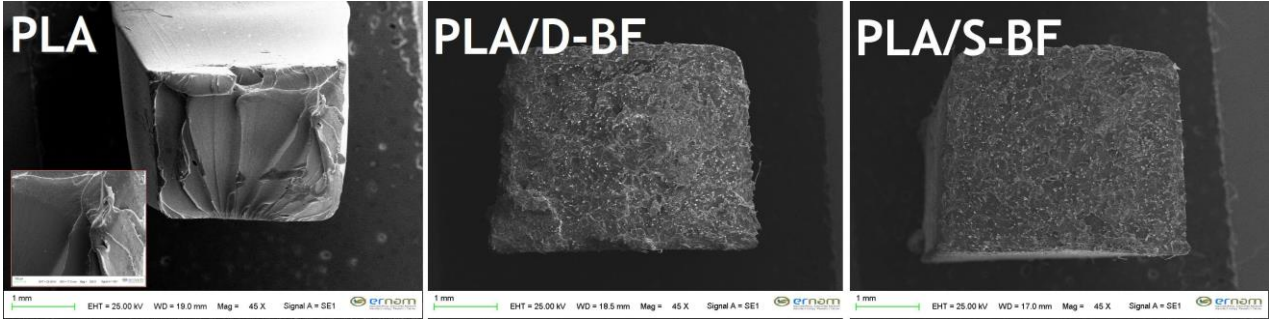
Şekil 3. Kompozitlerin darbe testi sonucu kırık yüzeylerinin 250x (a-c) ve 1000x büyütme (b-d) oranlarında SEM mikro-resimleri

### 3.3 Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Çizelge 2'de numunelerin mekanik test sonuçları listelenmiştir. PLA ve kompozitlerin çekme testi sonucu kopma yüzeylerinin SEM mikro-fotoğrafları Şekil 4'te paylaşılmıştır. PLA ve kompozitlerin çekme dayanım eğrileri Şekil 5'te gösterilmiştir.

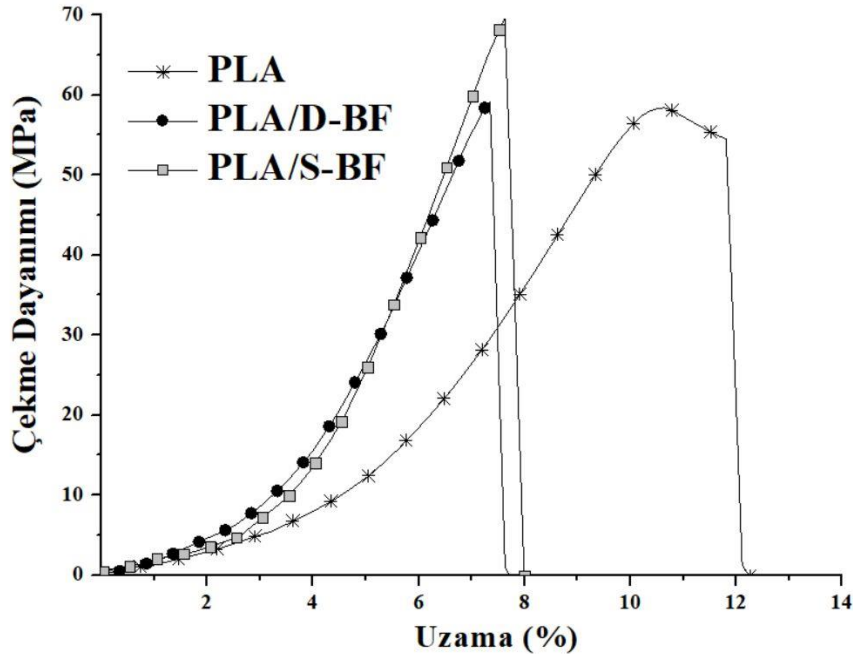
Çizelge 2. PLA ve kompozitlerin mekanik test sonuçları

Numune	Kopmada Uzama (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Darbe Dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	Sertlik (Shore D)
PLA	12,2 ± 0,7	58,4 ± 0,8	10,8 ± 0,4	50,1 ± 0,2
PLA/D-BF	7,7 ± 0,4	59,2 ± 0,6	12,2 ± 0,3	52,7 ± 0,2
PLA/S-BF	8,0 ± 0,5	69,6 ± 1,1	15,3 ± 0,5	53,4 ± 0,3



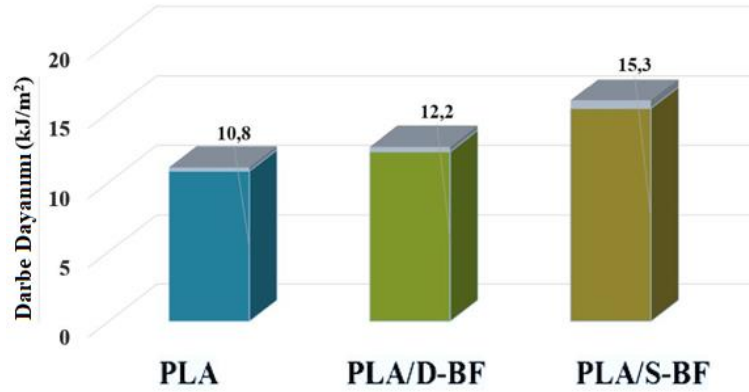
Şekil 4. PLA ve kompozitlerin kopma yüzeylerinin SEM mikro-resimleri

PLA ile karşılaştırıldığında, elyaf takviyesi ile kompozitlerin çekme gücü artmıştır. S-BF içeren kompozit için çekme dayanımındaki artış (yaklaşık %19) belirgin iken, PLA/D-BF için artış düşük seviyede kalmıştır. Ekleme yapılmamış PLA çekme-uzama eğrisinde az oranda sünme davranışı göstermiş, elyaf takviyesi ile sünme davranışı kaybolmuştur. İki tür BF takviyesi ile kopmada uzama değerlerinde azalma (yaklaşık %37 ve %34) tespit edilmiştir. Elyaf ile güçlendirilmiş kompozitler için bu azalma beklenen bir sonuçtur. S-BF içeren kompozit, D-BF içerene oranla az bir seviyede yüksek uzama değerine sahiptir. PLA ve kompozitlerin kopma yüzeyleri (Şekil 4) incelendiğinde, deformasyon sırasında numunelerin kopmaya direnç gösterdiği güçlü kısımları ve kopmanın başladığı zayıf kısımları gözlenmektedir. PLA/D-BF kompoziti yüzeyinde zayıf lif-polimer yapışması, kopma deformasyonun yayılımına sebebiyet verdiği anlaşılmaktadır (Ceritbinmez ve ark., 2021).



Şekil 5. PLA ve kompozitlerin çekme-uzama eğrileri

Yapılan Shore sertlik ölçümleri incelendiğinde, BF eklemeleri ile PLA ile kıyasla yüksek sertlik değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. S-BF içeren kompozitin sertlik değeri D-BF içerene göre 0.7 birim fazla bulunmuştur. Elyaf yüzeyi ile polimer fazı arasındaki yüzeysel tutunma, kompozitin Shore sertlik parametresinde artışa sebebiyet vermiştir. Lif parçacıklarının kompozit yapısı içinde homojen dağılması ve fazlar arasındaki yüzeysel yapışmadaki iyileşmenin kompozitin Shore sertliğinde artışa sebebiyet vermesi, elyaf takviyeli polimerik kompozitlerin sertlik davranışını inceleyen benzer çalışmalarda da gözlenmiştir (Dike, 2020; Raghunath Reddy ve ark., 2010; Siddika ve ark., 2014; Tayfun ve ark., 2017).



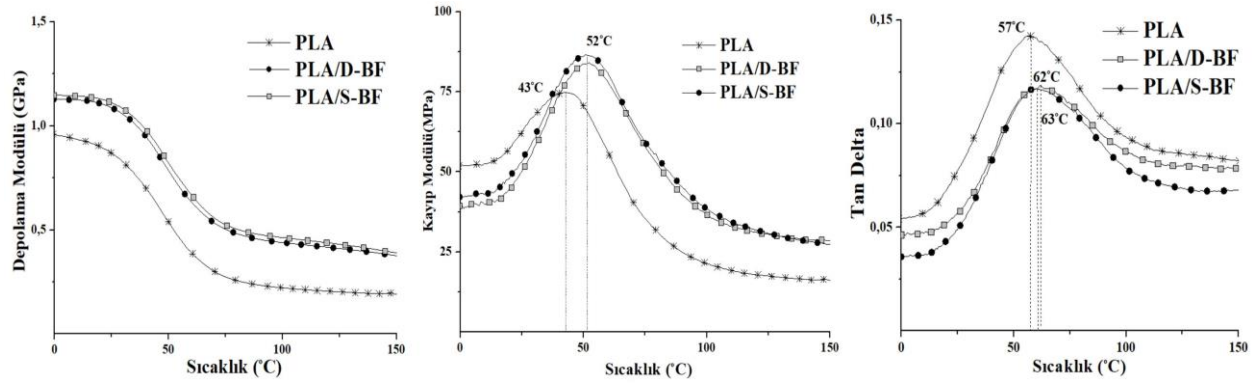
Şekil 6. PLA ve kompozitlerin darbe dayanım değerleri

PLA ve kompozitlerin darbe dayanım davranışları incelendiğinde, PLA matrisine D-BF eklenmesi kompozitin darbe dayanımını yaklaşık %20 yükseltmişken, S-BF eklenmesi ile PLA'nın darbe dayanımında yaklaşık %50 artışa ulaşılmıştır (Şekil 6). BF-PLA arayüzündeki silan kaplamanın fazlar arasındaki yüzeysel uyumu artırmasından dolayı S-BF takviyeli PLA kompozitinin darbe deformasyonuna karşı daha fazla direnç sergilediği görülmüştür. Elyaf yüzeyindeki kaplamanın güçlendirici etkisinin, polimer matris ile elyaf arasında etkin yapışma sayesinde polimer fazındaki mekanik deformasyonu eklentiye aktararak sönmülmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Ahmed ve ark., 2020; Deak ve ark., 2010; Kaymakçı ve Uyanık, 2020; Liu ve ark., 2019; Zelenetskii ve ark., 1997).

### 3.4 Kompozitlerin Isıl-mekanik Performansları

PLA ve kompozitlerin DMA grafiklerini içeren Şekil 7 incelendiğinde, PLA'nın depolama modülü BF yüklemeleriyle artış sergilediği anlaşılmaktadır. D-BF ve S-BF takviyeli kompozitler, birbirine yakın değerlerde depolama modülü grafikleri vermiştir. BF yüzeyindeki kaplamanın kompozitlerin kayıp modülü eğrilerinde belirgin şekilde görülmektedir. Gerek kayıp modül pik değeri gerekse pik sıcaklığı kompozitlerde PLA'ya kıyasla yüksek değerlerde saptanmıştır. Tan delta eğrilerine bakıldığında, kompozitlerin kayıp faktörlerinin, eklentisiz PLA'dan düşük seviyelerde olduğu bulunmuştur. PLA'nın camsı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ), kompozit yapısındaki BF fazının PLA zincirlerinin hareketliliğini kısıtladığından D-BF yüklemesinden sonra 5 °C, S-BF eklendikten sonra ise 6 °C artırmıştır. Eklentisiz PLA'nın DMA parametrelerinde ve  $T_g$  değerindeki artışın BF demetlerinin polimer zincirlerinin serbest hareketliliğini kısıtlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Jandas ve ark., 2011; Takayama ve ark., 2014).

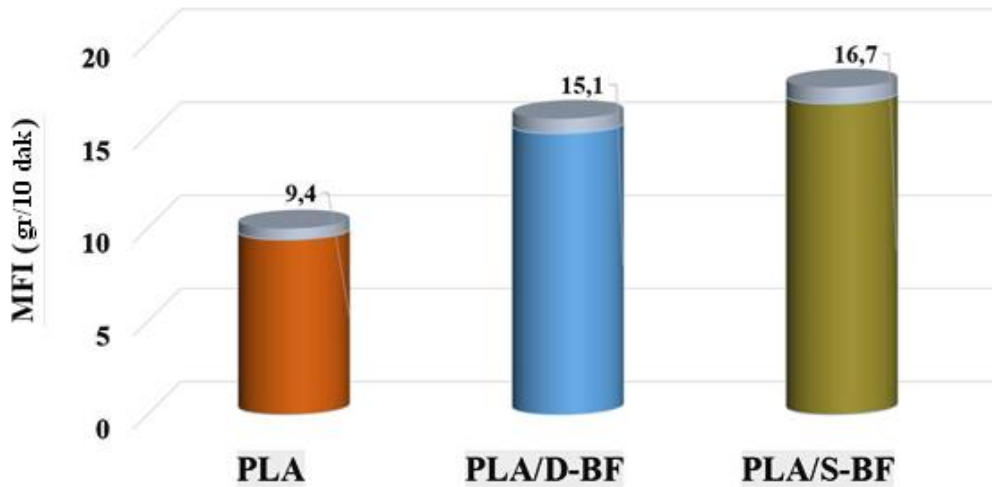




Şekil 7. PLA ve kompozitlerin DMA grafikleri

### 3.5 Kompozitlerin Eriyik-akış Davranışları

BF yüksek boy/çap (L/D) yapısından dolayı eriyik haldeki polimerin akışını arttırmaktadır. Yüzeyi silan kaplı BF, PLA ile iyi yüzey etkileşimine girdiği için polimerik matris içerisinde daha homojen dağılmış, bu da eriyik viskozitesini düşürerek kompozitlerin MFI değerini yükseltmiştir (Şekil 8). BF lif demetleri enjeksiyon işlemi sırasında akış doğrultusunda yönlendiğinden dolayı her bir elyaf eriyik haldeki polimere tutunarak akış yönünde kompozitin akış hızını arttırmış ve eklentisiz polimere kıyasla yüksek MFI değerlerinin gözlenmesine neden olmuştur (Bledzki ve Faruk, 2005; Eselini ve ark., 2020; Geethamma ve ark., 1996; Hristov ve Vlachopoulos, 2007; Xu ve ark., 2021; Zhou ve ark., 2019). S-BF ile PLA arasında PLA/D-BF sistemine kıyasla daha güçlü tutunma gerçekleştiği için silan kaplı BF, PLA fazına güçlü şekilde tutunarak akış hızını daha da arttırmıştır.



Şekil 8. PLA ve kompozitlerin MFI değerleri

## 4. SONUÇ

PLA matrisine yüzeyi silan kaplı ve yüzey katmanı kaldırılmış BF eklenmesi kıyaslandığında aşağıdaki çıkarımlar elde edilmiştir;

- BF yüzeyindeki silan katmanı, PLA ile lif etkileşimini artırarak kompozitlerin mekanik, ısıl-mekanik, akış ve morfolojik özelliklerinde belirgin iyileşmelere neden olmuştur.
- BF eklenmesi, PLA'nın mekanik dayanımını arttırmıştır. S-BF ile hazırlanan kompozitte PLA'nın çekme dayanımına oranla %19 civarında daha yüksek çekme dayanımı değeri saptanmıştır. S-BF içeren kompozitin darbe dayanımı, PLA'nın darbe direncine oranla %42 civarında yüksek bulunmuştur.

- D-BF ve S-BF yüklemeleri PLA'nın eriyik akışında yönlendirmesinden dolayı MFI değerlerinde, sırasıyla %61 ve %78 civarında artışa sebebiyet vermiştir.
- DMA sonuçları incelendiğinde; hazırlanan kompozitlerin  $T_g$  değerleri PLA'nınki ile kıyaslandığında 5 ve 6 °C yükseldiği bulunmuştur.
- Kompozitlerin SEM mikro-grafikleri incelendiğinde; MFI ve diğer test sonuçları ile paralel olarak silan modifikasyonu ile, bazalt liflerinin PLA içerisinde daha homojen dağılım sağladığı tespit edilmiştir.
- Bu gözlemler ışığında, BF fazının polimer zincirlerinin moleküler hareketlerini sınırlandırdığı anlaşılmaktadır.

## 5. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## 6. YAZAR KATKISI

Çağrıalp Arslan çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, Mehmet Doğan veri toplama ve veri analizi, Ümit Tayfun veri analizi ve yorumlama.

## 7. KAYNAKLAR

- Ahmad F., Choi H.S., Park M.K., A review: Natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties. *Macromolecular Materials and Engineering*, 300(1), 10-24, 2015.
- Ahmed S.A., Tirkes S., Tayfun U., Reinforcing effect of polyurethane sizing on properties of acrylonitrile–butadiene–styrene composites involving short carbon fiber. *SN Applied Sciences*, 2(12), 1-9, 2020.
- Akampunguza O., Wambua P.M., Ahmed A., Li W., Qin X.H., Review of the applications of biocomposites in the automotive industry. *Polymer Composites*, 38(11), 2553-2569, 2017.
- Arslan C., Dogan M., Effect of fiber amount on mechanical and thermal properties of (3-aminopropyl) triethoxysilane treated basalt fiber reinforced ABS composites. *Materials Research Express*, 6(11), 115340, 2019.
- Arslan C., Dogan M., The effects of silane coupling agents on the mechanical properties of basalt fiber reinforced poly (butylene terephthalate) composites. *Composites Part B: Engineering*, 146, 145-154, 2018.
- Auras R., Harte B., Selke S., An overview of polylactides as packaging materials. *Macromolecular Bioscience*, 4(9), 835-864, 2004.
- Aykanat O., Ermeydan M.A., Production of basalt/wood fiber reinforced polylactic acid hybrid biocomposites and investigation of performance features including insulation properties. *Polymer Composites*, 43(6), 3519-3530, 2022.
- Bajpai P.K., Singh I., Madaan J., Development and characterization of PLA-based green composites: A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 27(1), 52-81, 2014.
- Bledzki A.K., Faruk O., Effects of the chemical foaming agents, injection parameters, and melt-flow index on the microstructure and mechanical properties of microcellular injection-molded wood-fiber/polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 97(3), 1090-1096, 2005.

- Ceritbinmez F., Yapici A., Kanca E., The effect of nanoparticle additive on surface milling in glass fiber reinforced composite structures. *Polymers and Polymer Composites*, 29(9S), S575-S585, 2021.
- Chauhan V., Kärki T., Varis J., Review of natural fiber-reinforced engineering plastic composites, their applications in the transportation sector and processing techniques. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 35(8), 1169-1209, 2022.
- Chemtob A., Courtecuisse F., Croutxe-Barghorn C., Rigolet S., Simultaneous sol-gel and anionic photopolymerization of 3-(glycidyloxypropyl)trimethoxysilane via photobase catalysis. *New Journal of Chemistry*, 35, 1803–1808, 2011.
- Chen X., Li Y., Gu N., A novel basalt fiber reinforced polylactic acid composite for hard tissue repair, *Biomedical Materials*, 5, 1-8, 2010.
- Deák T., Czígány T., Tamás P., Németh C., Enhancement of interfacial properties of basalt fiber reinforced nylon 6 matrix composites with silane coupling agents. *Express Polymer Letters*, 4(10), 2010.
- Dhand V., Mittal G., Rhee K.Y., Park S.J., Hui D., A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 73, 166-180, 2015.
- Dike A.S., Improvement of mechanical and physical properties of carbon fiber-reinforced polyamide composites by applying different surface coatings for short carbon fiber. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 33(4), 541-553, 2020.
- Dike A.S., Preparation and characterization of calcite loaded poly (lactic acid) composite materials. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 13(1), 162-170, 2020.
- Eselini N., Tirkes S., Akar A.O., Tayfun U., Production and characterization of poly (lactic acid)-based biocomposites filled with basalt fiber and flax fiber hybrid. *Journal of Elastomers and Plastics*, 52(8), 701-716, 2020.
- Fiore V., Scalici T., Di Bella G., Valenza A., A review on basalt fibre and its composites. *Composites Part B: Engineering*, 74, 74-94, 2015.
- Geethamma V.G., Ramamurthy K., Janardhan R., Thomas S., Melt flow behavior of short coir fiber reinforced natural rubber composites. *International Journal of Polymeric Materials*, 32(1-4), 147-161, 1996.
- Gur'ev V.V., Neproshin E.I., Mostovoi G.E., The effect of basalt fiber production technology on mechanical properties of fiber. *Glass Ceramics*, 58, 62–65, 2001.
- Hasan K.F., Horváth P.G., Alpár T., Potential natural fiber polymeric nanobiocomposites: A review. *Polymers*, 12(5), 1072, 2020.
- Hristov V., Vlachopoulos J., Influence of coupling agents on melt flow behavior of natural fiber composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 292(5), 608-619, 2007.
- Ilyas R.A., Zuhri M.Y.M., Aisyah H.A., Asyraf M.R.M., Hassan S.A., Zainudin E.S., Sapuan S.M., Sharma S., Bangar S.P., Jumaidin R., Nawab Y., Sari N.H., Natural fiber-reinforced polylactic acid, polylactic acid blends and their composites for advanced applications. *Polymers*, 14(1), 202, 2022.
- Jamshaid H., Mishra R., A green material from rock: basalt fiber—a review. *The Journal of The Textile Institute*, 107(7), 923-937, 2016.
- Jandas P.J., Mohanty S., Nayak S.K., Srivastava H., Effect of surface treatments of banana fiber on mechanical, thermal, and biodegradability properties of PLA/banana fiber biocomposites. *Polymer Composites*, 32(11), 1689-1700, 2011.

- Kaymakçı O., Uyanık N., High performance silane coupled basalt fiber–polypropylene composites prepared by melt compounding. *AIP Conference Proceedings*, 2205, 020018, 2020.
- Khandelwal S., Rhee K.Y., Recent advances in basalt-fiber-reinforced composites: Tailoring the fiber-matrix interface. *Composites Part B: Engineering*, 192, 108011, 2020.
- Kurniawan D., Kim B.S., Lee H.Y., Lim J.Y., Effect of silane treatment on mechanical properties of basalt fiber/poly(lactic acid) ecofriendly composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 52(1), 97-100, 2013.
- Kurniawan D., Kim B.S., Lee H.Y., Lim J.Y., Towards improving mechanical properties of basalt fiber/poly(lactic acid) composites by fiber surface treatments. *Composite Interfaces*, 22, 553-562, 2015.
- Lilli M., Jurko M., Sirjovova V., Zvonek M., Cech V., Scheffler C., Rogero C., Ilyn M, Tirillò J, Sarasini F., Basalt fibre surface modification via plasma polymerization of tetravinylsilane/oxygen mixtures for improved interfacial adhesion with unsaturated polyester matrix. *Materials Chemistry and Physics*, 274, 125106, 2021.
- Liu S., Dong C., Yuan C., Bai X., Study of the synergistic effects of fiber orientation, fiber phase and resin phase in a fiber-reinforced composite material on its tribological properties. *Wear*, 426, 1047-1055, 2019.
- Liu T., Yu F., Yu X., Zhao X., Lu A., Wang J., Basalt fiber reinforced and elastomer toughened polylactide composites: Mechanical properties, rheology, crystallization and morphology. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(2): 1292-1301, 2012.
- Murariu M., Dubois P., PLA composites: From production to properties. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 17–46, 2016.
- Musa L., Kumar N.K., Abd Rahim S.Z., Rasidi M.S.M., Rennie A.E.W., Rahman R., Kanani Y.Y., Azmi A.A., A review on the potential of poly(lactic acid) based thermoplastic elastomer as filament material for fused deposition modelling. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 2841-2858, 2022.
- Nagarajan V., Mohanty A.K., Misra M., Perspective on poly(lactic acid) (PLA) based sustainable materials for durable applications: Focus on toughness and heat resistance, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4, 2899–2916, 2016.
- Nasir M.H.M., Taha M.M., Razali N., Ilyas R.A., Knight V.F., Norrrahim M.N.F., Effect of chemical treatment of sugar palm fibre on rheological and thermal properties of the PLA composites filament for FDM 3D printing. *Materials*, 15(22), 8082, 2022.
- Paunikallio T., Suvanto M., Pakkanen T.T., Grafting of 3-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate onto polypropylene and use as a coupling agent in viscose fiber/polypropylene composites. *Reactive and Functional Polymers*, 68, 797–808, 2008.
- Raghunath Reddy G.V., Deopura B.L., Joshi M., Studies on dry-jet-wet spun polyurethane fibers. II. Effect of polyurethane shore hardness on spinnability and fiber properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 116(2), 843-851, 2010.
- Rasal R.M., Janorkar A.V., Hirt D.E., Poly (lactic acid) modifications. *Progress in Polymer Science*, 35(3), 338-356, 2010.
- Ross A., Basalt fibers: Alternative to glass. *Composites Technology*, 12(4), 2006.
- Sang L., Han S., Li Z., Yang X., Hou W., Development of short basalt fiber reinforced polylactide composites and their feasible evaluation for 3D printing applications. *Composites Part B: Engineering*, 164, 629-639, 2019.

- Sbardella F., Martinelli A., Di Lisio V., Bavasso I., Russo P., Tirillò J., Sarasini F., Surface modification of basalt fibres with ZnO nanorods and its effect on thermal and mechanical properties of PLA-based composites. *Biomolecules*, 11(2), 200, 2021.
- Siakeng R., Jawaid M., Ariffin H., Sapuan S.M., Asim M., Saba, N., Natural fiber reinforced polylactic acid composites: A review. *Polymer Composites*, 40(2), 446-463, 2019.
- Siddika S., Mansura F., Hasan M., Hassan A., Effect of reinforcement and chemical treatment of fiber on the properties of jute-coir fiber reinforced hybrid polypropylene composites. *Fibers and Polymers*, 15(5), 1023-1028, 2014.
- Singha K., A short review on basalt fiber. *International Journal of Textile Science*, 1: 19–28, 2012.
- Tábi T., Bakonyi P., Hajba S., Herrera-Franco P.J., Czigány T., Kovács J.G., Creep behaviour of injection-moulded basalt fibre reinforced poly (lactic acid) composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(21), 1600-1610, 2016.
- Tábi T., Égerházi A.Z., Tamás P., Czigány T., Kovács J.G. Investigation of injection moulded poly (lactic acid) reinforced with long basalt fibres. *Composites: Part A*, 64, 99–106, 2014.
- Takayama T., Daigaku Y., Ito H., Takamori H., Mechanical properties of bio-absorbable PLA/PGA fiber-reinforced composites. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(10), 4151-4154, 2014.
- Tayfun Ü., Doğan M., Application of surface modification routes to coconut fiber for its thermoplastic-based biocomposite materials. *Sustainable Natural Fiber Composites*, 122, 110-127, 2022.
- Tayfun Ü., Doğan M., Bayramlı E., Polyurethane elastomer as a matrix material for short carbon fiber reinforced thermoplastic composites. *Anadolu University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 18(3), 682-694, 2017.
- Torun A.R., Dike A.S., Yıldız E.C., Sağlam I., Choupani N., Fracture characterization and modeling of Gyroid filled 3D printed PLA structures. *Materials Testing*, 63(5), 397-401, 2021.
- Xu J., Hao X., Tang W., Zhou H., Chen L., Guo C., Wang Q., Ou R., Mechanical properties, morphology, and creep resistance of ultra-highly filled bamboo fiber/polypropylene composites: Effects of filler content and melt flow index of polypropylene. *Construction and Building Materials*, 310, 125289, 2021.
- Zelenetskii A.N., Gorbatkina Y.A., Kuperman A.M., Zelenskii E.S., Pirogov O.N., Fiber-matrix interaction in composites based on polypropylene and glass and basalt fibers. *Polymer Science Series A*, 39(10), 1116-1121, 1997.
- Zhou H., Liu H., Jiang Q., Kuang T., Chen Z., Li W., Effect of process parameters on short fiber orientation along the melt flow direction in water-assisted injection molded part. *Advances in Materials Science and Engineering*, 7201215, 2019.

Araştırma Makalesi / Research Article

YSZ Seramik Üst Kaplamaya Sahip Termal Bariyer Kaplamaların (TBCs) Katı Partikül Erozyon (SPE) Davranışlarının İncelenmesi

Derviş ÖZKAN<sup>1\*</sup>, Garip ERDOĞAN<sup>2</sup>, Yasin ÖZGÜRLÜK<sup>3</sup>, Gülfem BİNAL<sup>4</sup>,  
Sefa Erdem YILMAZ<sup>5</sup>, Abdullah Cahit KARAOĞLANLI<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4978-290X>, [dervisozkan@bartin.edu.tr](mailto:dervisozkan@bartin.edu.tr)

<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3924-9984>, [gerdogan@sakarya.edu.tr](mailto:gerdogan@sakarya.edu.tr)

<sup>3</sup> Bartın Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Optisyenlik Programı, Bartın, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1121-5018>, [yozgurluk@bartin.edu.tr](mailto:yozgurluk@bartin.edu.tr)

<sup>4</sup> Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4750-8787>, [gbinal@bartin.edu.tr](mailto:gbinal@bartin.edu.tr)

<sup>5</sup> Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6560-2454>, [sefaerdemylmaz@gmail.com](mailto:sefaerdemylmaz@gmail.com)

<sup>6</sup> Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1750-7989>, [karaoglanli@bartin.edu.tr](mailto:karaoglanli@bartin.edu.tr)

Geliş/ Received: 14.01.2023;

Kabul / Accepted: 26.02.2023

**ÖZET:** Gaz türbin motorları servis kullanım koşulları altında farklı birçok hasar mekanizmasına maruz kalmaktadır. Bunlardan birisi de yabancı madde hasarı (FOD) ve diğer yabancı partiküllerin (volkan küller vb.) oluşturduğu yüzey üzerinde meydana gelen hasar yapılarıdır. Bu durumlara bağlı olarak türbin bileşenlerini oluşturan türbin bıçağı ve kanatçık gibi komponentlerde dökülme ve pullanarak kalkma gibi hasar oluşumları meydana gelmektedir. Belirtilen partiküllerin yüksek hızlarda ve farklı açılarda malzeme yüzeyine tekrarlı çarpması sonucunda katı partikül erozyon (SPE) hasarları meydana gelmektedir. Bu çalışmada, Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme üzerine CoNiCrAlY bağ ve yitriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) içeriğine sahip seramik üst kaplamalar atmosferik plazma sprej (APS) püskürtme yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen termal bariyer kaplama (TBC) sistemindeki SPE sonucu oluşan mikroyapısal ve yüzey üzerindeki oluşum gösteren değişimler incelenmiştir. SPE testleri alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) partiküllerinin kullanılmasıyla literatürde yaygın olarak çalışılmayan 25°, 50° ve 75°'lik püskürtme açılarında çalışılmış ve bu açılarda yapılan erozif aşınma testlerinde ortaya çıkan hasar mekanizmaları ve erozif aşınma oranı ayrıntılı olarak incelenmiştir. TBC kaplamalı numunelerde en yüksek erozyon oranı 50°'lik çarpma açısında gerçekleşirken bu değeri sırasıyla 75° ve 25°'lik çarpma açısı takip etmiştir. Çalışmalarda

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: [dervisozkan@gmail.com](mailto:dervisozkan@gmail.com)

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Özkan, D., Erdoğan, G., Özgürlük, Y., Binal, G., Yılmaz, S.E., Karaoğlanlı, A.C. (2023). YSZ Seramik Üst Kaplamaya Sahip Termal Bariyer Kaplamaların (TBCs) Katı Partikül Erozyon (SPE) Davranışlarının İncelenmesi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 100-115.

gerçekleştirilen alansal pürüzlülük ölçümlerinde erozyon oranlarının alansal pürüzlülük değerleri ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. En yüksek alansal pürüzlülük değerlerinin 50°'lik çarpma açısında oluşum gösterdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Süper alaşım, CoNiCrAlY, Yttria ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ), Termal bariyer kaplama (TBC), Hasar mekanizması, Katı partikül erozyonu (SPE).

## **Investigation of Solid Particle Erosion (SPE) Behaviors of Thermal Barrier Coatings (TBCs) with YSZ Ceramic Top Coating**

**ABSTRACT:** Under operating conditions, gas turbine engines are subjected to a wide range of damage mechanisms. One of them is foreign object damage (FOD) and damage structures that occur on the surface formed by other foreign particles (volcanic ash etc.). Depending on these situations, damage formations such as spalling and flaking occur in components such as turbine blades and fins that comprise the turbine components. Solid-particle erosion (SPE) damages occur as a result of the repeated impact of the specified particles on the material surface at high speeds and at different angles. In this study, a CoNiCrAlY bond coat and ceramic top coat with yttria stabilized zirconia (YSZ) content on an Inconel 718 superalloy substrate were produced using the atmospheric plasma spray (APS) spraying method. Microstructural and surface changes resulting from SPE in the produced thermal barrier coating (TBC) system were investigated. Using alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) particles, SPE tests were done at impact angles of 25°, 50° and 75°, which are not commonly studied in the literature. The damage mechanisms and erosive wear rates that occurred in the tests conducted at these angles were examined in detail. While the highest erosion rate in TBC coated samples occurred at an impact angle of 50°, this value was followed by those of 75° and 25°, respectively. In the areal roughness measurements carried out in the studies, it was seen that the erosion rates were directly proportional to the areal roughness values. It has been observed that the highest areal roughness values occur at an impact angle of 50°.

**Keywords:** Super alloy, CoNiCrAlY, Yttria-stabilized zirconia (YSZ), Thermal barrier coating (TBC), Failure mechanism, Solid particle erosion (SPE).

### **1. GİRİŞ**

TBC'ler, kritik türbin motoru parçalarını (kanatlar, yanma odaları, vb.) yüksek sıcaklıklardan ve agresif servis koşullarından korumak amacıyla uzun yıllardır kullanılmaktadır (Golewski ve ark., 2019). TBC'ler, sıcak gaz akışı ile metalik altlık arasında bir yalıtım tabakası sağlayarak gaz türbini motorlarının çalışma sıcaklıklarının artmasını sağlar. Ayrıca motorların sıcak bölümlerinin ömrünü uzatmanın yanı sıra özgül yakıt tüketimini de iyileştirirler (Shin ve ark., 2018). TBC'ler genellikle; seramik üst kaplama (genellikle ağırlıkça %6–8 YSZ, MCrAlY (M=Ni ve/veya Co) ve bu iki tabaka arasına nüfuz eden oksijen ve ısı etkisiyle zamanla oluşan TG) olarak adlandırılan üç katmandan oluşur (Özkan, 2022). YSZ ile altlık malzemenin ısıl genleşme katsayılarındaki farklılıktan kaynaklanan uyumsuzluğu, sünek malzeme özelliği göstererek ortadan kaldırmak bağ kaplamanın önemli bir görevidir (Demirci ve ark., 2022). YSZ, yüksek termal genleşme katsayısına, düşük termal iletkenliğe, alfa Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile faz uyumluluğuna, yüksek erime noktasına ve büyük partikül darbelerinden ve darbe erozyonundan kaynaklanan hasara karşı iyi dirence sahip olduğundan, TBC üst kaplamalarda yaygın olarak kullanılan seramik bir malzemedir (Malvi ve ark., 2021). Son zamanlarda yapılan çalışmalar yüksek entropili alaşımların (HEAs) sahip oldukları üstün nitelikleri sonucuyla,

özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında TBC sistemlerinde alternatif bir malzeme olarak kullanılabilceğini göstermiştir (Özkan ve Karaoğlanlı, 2021). TBC sistemlerinde altlık malzemesini yüksek sıcaklıktaki korozyon ve oksidasyondan korumak için alev püskürtme, plazma püskürtme, soğuk püskürtme, yüksek hızlı oksijen yakıtı (HVOF) ve D-gun gibi çeşitli termal sprey püskürtme yöntemleri kullanılır (Binal, 2022; Parlakyiğit ve ark., 2020). TBC'ler genellikle APS ya da Elektron Işını Fiziksel Buhar Biriktirme (EB-PVD) yöntemleri kullanılarak üretilmektedir. Biriktirme tekniğine göre farklı mikroyapısal morfolojiler, termal ve mekanik özellikler elde edilebilir. Tipik APS TBC'ler, ince yuvarlak mikro gözenekler, katmanlar arası gözenekler, transgranüler çatlaklar ve seramik splatların üst üste binmesinden oluşan gözenekler içeren bir mikro yapıya sahiptir (Karaoglanli, 2023, Cernuschi ve ark., 2016). Kullanım sırasında TBC'ler, oksidasyon, sıcak korozyon, termal şok, sinterleme etkisi, CMAS (CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>) etkisi ve aşınma gibi birçok hasar mekanizmasına maruz kalmaktadır. Bu hasar mekanizmaları, TBC sisteminin bütünlüğü ve mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere sahiptir (Karaoğlanlı ve ark., 2019; Özgürlük ve ark., 2018). SPE, özellikle kumlu ortamda çalışan gaz türbinlerinde kullanılan TBC'ler için birincil hasar mekanizmalarındandır (Wang ve ark., 2012). SPE, katıların, sıvıların, gazların veya bunların kombinasyonlarının çarpması nedeniyle metalik bir yüzeyin metal kaldırma veya bozunma mekanizmasıdır. Termik santrallerde, uçak motorlarının gaz türbinlerinde, uçak yapılarında, rafinerilerde ve petrokimya endüstrilerinde ciddi bir sorundur (Kumar ve ark., 2021). SPE, küçük katı partiküllerin bir gaz veya sıvı ortamda malzeme yüzeyine tekrarlayan etkileri nedeniyle malzemede yüzey kütle kaybına ve son olarak TBC'lerin parçalanmasına yol açan önemli bir husustur (Zhang ve ark., 2018). Hava araçlarının gaz türbinleri söz konusu olduğunda, kum ve volkanik küller ana aşındırıcı kaynakları iken, kara araçlarındaki gaz türbinleri söz konusu olduğunda, filtrelerden kaçan veya yanma odasında üretilen partiküller erozyondan sorumludur (Cemuschi ve ark., 2014). SPE, birim zamanda yüzeye çarpan partikül sayısı ve boyutu, çarpma açısı, partikül kinetik enerjisi, altlık malzeme özellikleri, atmosfer ve sıcaklıktan etkilenen bir hasar türüdür (Nomoto ve ark., 2017). SPE kaynaklı oluşacak hasarların önceden doğru bir şekilde tahmin edilmesi, TBC'lerin çalışma/servis ortam koşulları altındaki performansının ve kullanım ömürlerinin belirlenmesi, tamir ve bakım maliyetlerinin en aza indirilmesi hususunda önemli bir faktördür. Bu çalışmada, Inconel 718 altlık malzeme üzerine APS yöntemi kullanılarak MCrAlY metalik bağ ve YSZ seramik üst kaplama içeriğine sahip kaplamalar üretilmiştir. TBC sistemi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülleri ile SPE deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler 25°-50°-75° partikül çarpma açılarında ve 1,5 bar püskürtme basıncında gerçekleştirilmiştir. Eroziyon aşınma testleri sonrasında taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik profilometre ile aşınma yüzeyleri incelenerek karakterize edilmiş ve tartışılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1 Deney Malzemeleri

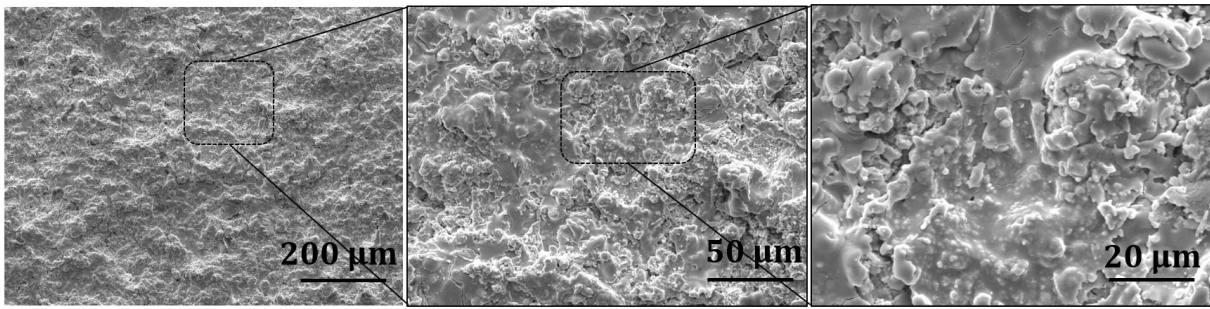
SPE aşınma deneylerinde, altlık malzemesi olarak Inconel 718 süper alaşım seçilmiştir. Inconel 718, yüksek sürünme dayanımı ve korozyon direncine sahip, havacılık/uzay endüstrisinde yaygın olarak kullanılan nikel-krom esaslı bir alaşımdır. Silindir çubuklar halinde ticari olarak elde edilen Inconel 718 süper alaşım altlık malzemeler tel erozyon yöntemi kullanılarak 25,4 mm çapında ve 5,0 ± 0,6 mm kalınlıkta olacak şekilde kesilmiştir. Kaplama işlemleri öncesi altlık numunelerinin yüzeyleri belirli pürüzlülük değerine (Ra= 5,3 ± 0,7) erişmesi ve kaplamanın yapışma mukavemetinin daha iyi olması için kumlama işlemine tabi tutulmuştur. Kumlama işleminde, altlık/hedef malzeme



yüzeyine ~60 cm'lik uzaklıktan yatayla yaklaşık 75°'lik açı oluşturacak şekilde ~2-2.5 bar değerindeki basınçlı hava yardımı ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları püskürtülmüştür. Kaplama süreçlerinin daha iyi yürütülebilmesine olanak sağlamak için, altlık malzeme yüzeyleri etil alkol ile ultrasonik temizleme yöntemi kullanılarak temizlenmiş ve kaplama işlemleri için hazırlanmıştır. Kaplama üretim parametreleri ise, sprey ekipmanı, literatür çalışmaları ve toz üretim firması tarafından sağlanan koşullar baz alınarak belirlenmiştir.

## 2.2 SPE Testleri

SPE test çalışmaları, özel olarak tasarlanmış test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deneylede kullanılan test düzeneği; ayarlanabilir numune fikstürü, nozul sabitleyici, basınçlı hava kompresörü ve elemanlarından oluşmaktadır. SPE aşınmasından önce alınan TBC numunelerinin SEM üst yüzey mikroyapı görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. TBC numunelerin SPE aşınma deneyleri öncesi üst yüzey SEM mikroyapı görüntüsü

Deneylelerden sonra mikroyapısal karakterizasyonlar gerçekleştirilmiş ve TBC kaplamaların sergilemiş oldukları hasar davranışları incelenmiştir. Ayrıca, erozif aşınma sonrası numunelerin iz derinlikleri ve aşınmış ölçümleri 3D optik profilometre (ProfilM3D brand-USA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çizelge 1'de ise deneylelerde kullanılan aşınma parametreleri verilmiştir. Deneylelerde aşındırıcı partikül olarak 170-230 mesh boyut aralığında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılmıştır.

Çizelge 1. Katı partikül erozif aşınma deney parametreleri

Aşındırıcı partikül	Aşındırıcı partikül boyutu (µm)	Basınç (Bar)	Kütlesel debi (gr/sn)	Numune fikstür açısı (Derece)	Nozul mesafesi (mm)	Nozul çapı (mm)
Alümina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	65-80	1,5	4,84	25 - 50 - 75	20	3

SPE deneylelerinde numunelerin ağırlık tartımları ± 0,0001 mg hassasiyete sahip Kern & Sohn marka hassas terazi ile gerçekleştirilmiştir. Her deney öncesi numune yüzeyleri yüksek basınçlı hava ile temizlenmiş ve sonrasında aşınma oranları hesaplanmıştır. Numunelerin aşınma öncesi ağırlıkları (m<sub>1</sub>) tespit edildikten sonra deney sonrası tekrardan ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deney öncesi ve deney sonrasında ölçülen deney numunesi ağırlıkları farkının aşındırıcı partikülün kütlesel debisine ( $\dot{m}$ ) ve zamana ( $t$ ) bölünmesi neticesinde katı partikül erozif aşınma oranı ( $E$ ) hesaplanmıştır.

$$E = \frac{(m_1 - m_2)}{\dot{m} \times t}$$

Kütlesel debiyi hesaplayabilmek için aşındırma süresince harcanan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının tespit edilmesi gerekmektedir. Bu durumu gerçekleştirebilmek amacıyla kullanılmış Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlarının biriktirebileceği bir hazne deney düzeneği tasarımına eklenmiştir. Gerçekleştirilen tüm deneyler sonrası biriktirilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları hassas terazi yardımı ile tartılmıştır. Deneylerde 145,2 gr Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozu kullanılmıştır. Kullanılan toz miktarını deney parametreleri aynı olduğu için deney sayısına bölerek her deney için kullanılan ortalama toz miktarı elde edilmiştir.

$$\dot{m} = \frac{m}{t}$$

Yukarıda verilen formüle göre  $\dot{m}$ = kütlesel debi (gr/sn),  $m$ = püskürtülen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerin ağırlığı (gr) ve  $t$ = püskürtme zamanını (s) ifade etmektedir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Kaplama Tozları ve Karakterizasyonları

Inconel 718 süper alaşım altlık malzemelerin metalik bağ kaplamaları MCrAlY (CoNiCrAlY, Oerlikon Amdry 9951) içeriğine sahip metalik tozları kullanılarak üretilmiştir. Ticari olarak elde edilen bağ kaplama tozları 38,5Co-32Ni-21Cr-8Al-0.5Y (%ağ.) kimyasal bileşime sahiptir. Çizelge 2’de TBC üretimlerinde kullanılacak olan CoNiCrAlY metalik bağ kaplama tozlarına ait özellikler ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 2. CoNiCrAlY metalik toz kaplama malzemesine ait özellikler

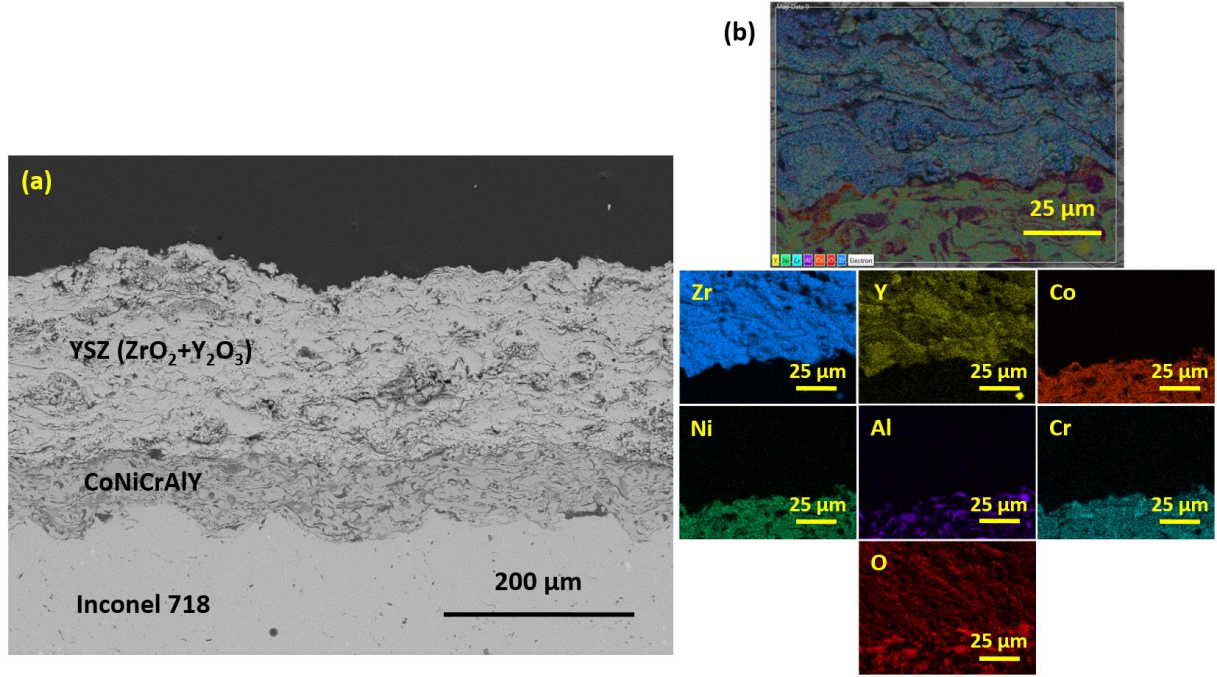
Toz kompozisyonu	Toz şekli	Üretim şekli	Üretici firma
CoNiCrAlY	Sferoidal (küremsi)	Gaz atomizasyon	Sulzer Metco

Toz ve altlık malzemelerin mikroyapısal karakterizasyon işlemleri Bartın Üniversitesi’nde bulunan MAIA3 XMU TESCAN marka SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Seramik üst kaplamaların üretiminde ticari YSZ (GTV) kaplama toz malzemesi kullanılmıştır. Bağ kaplama tozlarının ortalama partikül boyut dağılımı Microtrack S3500 cihazı kullanılarak ölçülmüş ve (D50) değeri 30,78 µm olarak belirlenmiştir. Bağ kaplama üretiminde kullanılan CoNiCrAlY tozlarının kimyasal kompozisyonu Çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 3. CoNiCrAlY tozun kimyasal kompozisyonu

Ürün Kodu	Partikül boyutu	Kimyasal kompozisyon (ağ. %)				
		Co	Ni	Cr	Al	Y
Oerlikon, Amdry 9951	5,6-39 µm	Kalan	29-35	18-24	5-11	0,1-0,8

TBC numuneleri bağ kaplama tabaka kalınlığı ~100 µm ± 20 µm ve YSZ seramik üst kaplama tabaka kalınlığı ~300 µm ± 40 µm olacak şekilde üretilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. SPE aşınma deneylerinde kullanılan TBC mikroyapısı: (a) APS yöntemiyle üretilmiş TBC numunesinin SEM ara yüzey kesit mikroyapı görüntüsü ve (b) TBC numunesine ait ara yüzey SEM elementel haritalama analizi

Üst kaplama malzemesi olarak YSZ seramik tozları kullanılmıştır. Üst kaplamaya ait malzeme özellikleri Çizelge 4’de verilmiştir.

Çizelge 4. YSZ üst kaplamaya ait sprej ve toz malzeme özellikleri

Kaplama türü	Sprej tabancası		Toz malzeme özellikleri	
	Teknik	Firma	Toz	Partikül boyutu (μm)
Üst kaplama	APS	F6-GTV Germany	ZrO <sub>2</sub> -8% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-45+20

Katı partikül erozif aşınma deneylerinde kullanılan TBC numunelerin bağ ve üst kaplama kullanılan APS parametreleri Çizelge 5’de verilmiştir.

Çizelge 5. CoNiCrAlY bağ ve YSZ kaplamalara ait püskürtme parametreleri

APS-Bağ Kaplama						
Ark akımı	Elektriksel güç	Argon akış oranı	Hidrojen akış oranı	Toz besleme oranı	Kaplama Mesafesi	
550-600 A	35-40 kW	55-65 slpm	15 slpm	20-30 g/dk	150 mm	
APS-Üst Kaplama						
Ark akımı	Elektriksel güç	Argon akış oranı	Hidrojen akış oranı	Toz besleme oranı	Ark voltajı	Kaplama Mesafesi
600-650 A	35-40 kW	40-50 slpm	14 slpm	20-30 g/dk	65V	100 mm

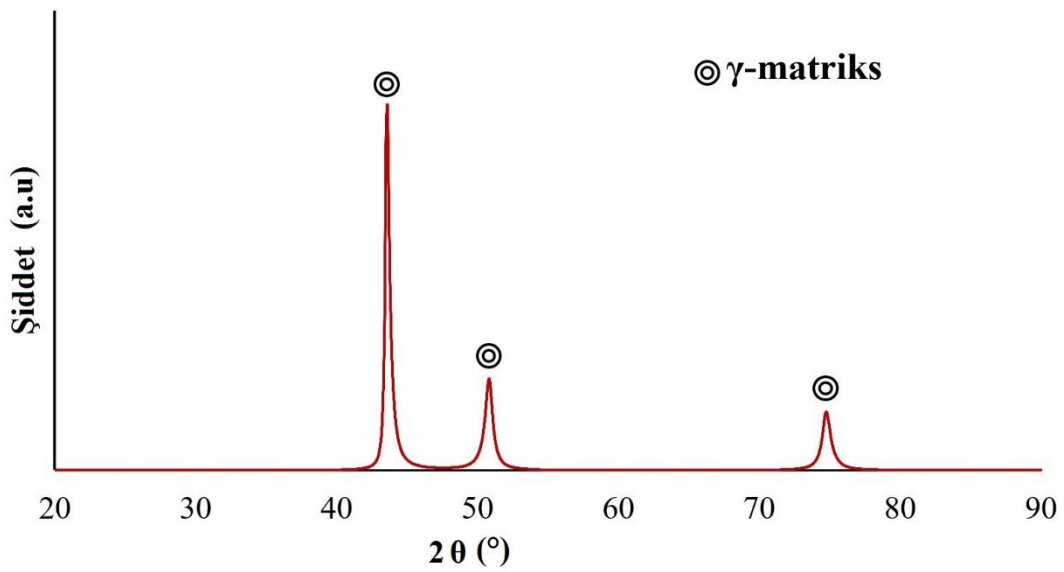
Atmosfere açık olarak gerçekleştirilmesi ve üretim sıcaklığının yüksek olmasından dolayı APS yöntemi ile üretilen TBC kaplamalar yoğun miktarda porozite, mikro çatlak ve oksit içermektedir.

Porozite ölçümlerinde önce TBC numunelerinden beşer adet mikroyapı resimleri alınmıştır. Ardından Image J analiz programı yardımıyla porozite yüzdeleri belirlenmiştir. Çizelge 6'da bağ ve üst kaplamaların porozite ölçüm sonuçları verilmiştir.

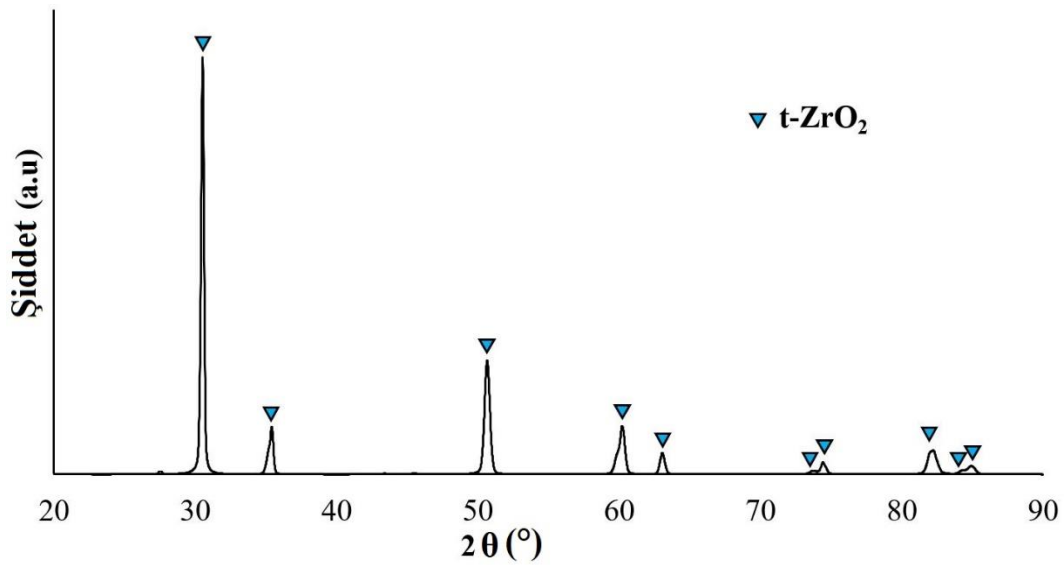
Çizelge 6. APS tekniği ile üretilmiş kaplamaların porozite değerleri

Malzeme	Bağ kaplama porozite oranı (%)	Üst kaplama porozite oranı (%)
APS-TBC	$5,0 \pm 1,5$	$8,0 \pm 2,0$

Şekil 3 ve Şekil 4'de APS tekniği kullanılarak üretilen bağ ve üst kaplamalara ait XRD analiz sonuçları verilmiştir. Bağ kaplamanın XRD analizinde,  $\gamma$  matriks fazı, üst kaplamanın XRD analizinde ise tetragonal  $ZrO_2$  fazı tespit edilmiştir.



Şekil 3. APS bağ kaplamalara ait XRD analizi sonucu



Şekil 4. YSZ kaplamalara ait XRD analizi sonucu

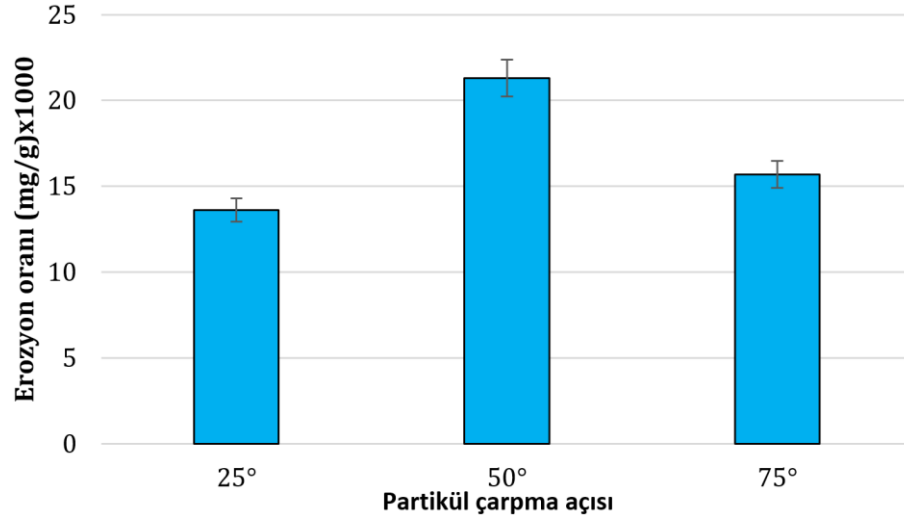
### 3.2. TBC'lerin SPE Aşınma Davranışları

TBC sistemine ait SPE deneyleri öncesi ve sonrası ağırlıkları, oluşan ağırlık kayıpları ve erozyon oranlarını içeren bilgiler Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. TBC'lerin SPE deneyleri sonrası malzeme kaybı ve aşınma oranları

Altık ve kaplama türü				Ağırlık kayıpları ve erozyon oranları			
Altık	Bağ kaplama	Üst kaplama	Çarpma açısı	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	Δm (g)	Erozyon oranı (E = (m <sub>1</sub> - m <sub>2</sub> / m × t)×1000)
Inconel 718	CoNiCrAlY	YSZ	25°	4,03	4,01	0,01	0,280
			50°	3,61	3,58	0,02	0,440
			75°	3,38	3,36	0,01	0,324

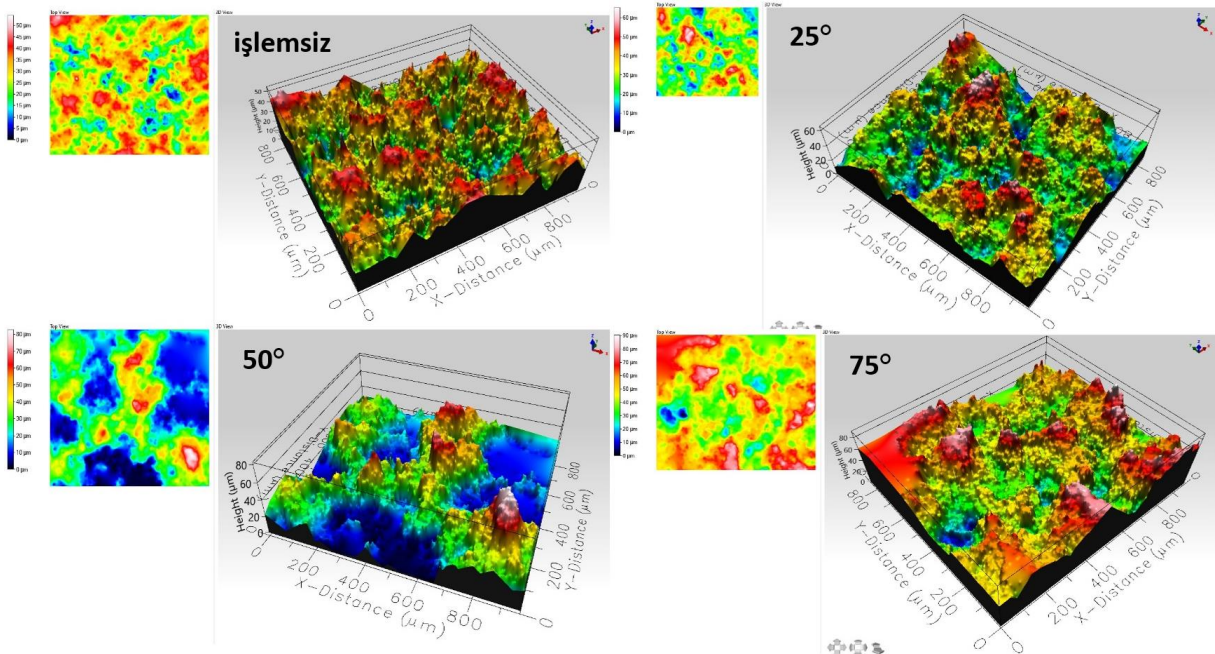
Şekil 5'de SPE deneylerinin gerçekleştirilme açıları ve erozyon oranları ilişkisi verilmektedir. 50°'de gerçekleştirilen deney sonuçlarında maksimum erozyon aşınma oranı tespit edilmiştir. Bu durum yüzey doyurma oranı ve partiküllerin deformasyon korelasyonu ile ilişkilidir. 50°'de gerçekleştirilen erozif aşınma oranını sırasıyla 75°'de ve 25°'de gerçekleştirilen deneyler sonrası meydana gelen erozyon oranları takip etmektedir. Partikül çarpma açısının, malzemelerin erozyon davranışı için en önemli parametrelerden biri olduğu bilinmektedir. Erozyon oranlarının çarpma açısına bağlı olarak sergilediği davranışlar sünek veya kırılğan olarak nitelendirilirler. Sünek yüzey özellikleri sergileyen malzemelerin düşük çarpma açıları (15°–30°) en yüksek erozyon hasarları ile karşılaştığı bilinmektedir. Gevrek yüzey özellikleri sağlayan malzemeler ise yüksek çarpma açıları (60°–90°) maksimum erozyon oranlarına ulaşırlar. Yarı sünek yüzey özelliklerine sahip malzemeler ise, 45°–60° çarpma açıları en yüksek erozyon oranlarına ulaştığı bilinmektedir (Chowdhury ve ark., 2016). Gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrası erozyon oranları incelendiğinde TBC numunelerinin yarı sünek yüzey özellikleri sergilediği tespit edilmiştir. Buna istinaden 50°'lik partikül çarpma açısında gerçekleştirilen SPE deneylerinde en yüksek erozyon oranlarına ulaşılmıştır. Essa vd. APS yöntemini kullanarak Inconel 718 altık malzeme üzerine YSZ üst kaplama ve CoNiCrAlY bağ kaplamadan oluşan TBC'ler üretmişlerdir. TBC kaplamaları oda sıcaklığında SPE aşınması deneylerine tabi tutmuşlardır. SPE deneylerini farklı partikül çarpma açısı (30°, 45°, 60°, 90°) gerçekleştirmişlerdir. SPE oranı ve partikül çarpma açısı arasındaki korelasyonu çarpma açısı büyüdükçe erozyon oranında artış gözlemlendiği şeklinde kurmuşlardır. Bununla birlikte yüksek çarpma hızlarında da SPE oranında artış olduğunu tespit etmişlerdir (Essa ve ark., 2021). Zhao vd. GH356 Ni bazlı süper alaşım altık malzeme üzerine APS yöntemi kullanarak geleneksel olmayan çift katmanlı La<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/YSZ TBC üretmişlerdir. TBC'lerin türbin kanatçıklarına sağladıkları mükemmel ısı yalıtım performansları ile son derece işlevsel kaplamalar olduğunu belirtmişlerdir. Ürettikleri TBC'leri 60° ve 90° çarpma açıları SPE aşınmasına tabi tutmuşlardır. SPE aşınmasında TBC hasarının oluşmasını yüzeyde kaplama kalınlığının azalması ve parçalanması olarak rapor etmişlerdir. Sonuçta 60° çarpma açısının, 90° çarpma açısına kıyasla daha yüksek oranda erozyona sebebiyet verdiğini tespit etmişlerdir. Çift katmanlı TBC'lerin geleneksel YSZ'lere kıyasla daha dayanımlı olduğunu da belirtmişlerdir (Zhao ve ark., 2022).



Şekil 5. TBC'lerin farklı partikül çarpma açılardaki erozyon oranları

### 3.2. TBC'lerin 3D profilometre analizi

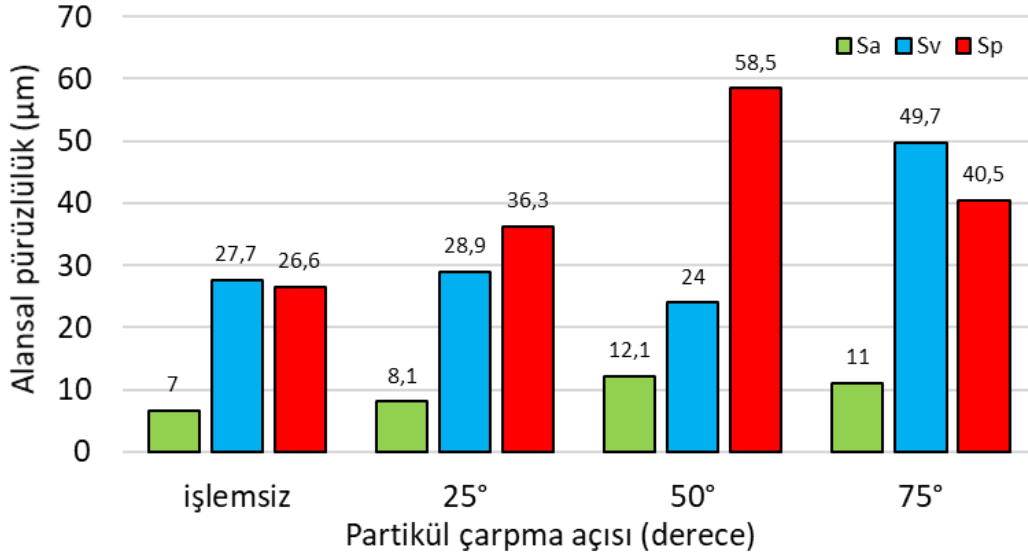
Şekil 6'da katı partikül erozif aşınma öncesi elde edilen TBC numunesinin ve farklı partikül çarpma açısı ile erozyona uğramış TBC'lerin 3D profilometre analizi sonuçları verilmektedir. SPE aşınmasına tabi tutulmuş numunelerinin deneyler sonrası 3D profilometre cihazı ile ortalama alansal pürüzlülük (Sa), maksimum çukur derinliği (Sv), maksimum pürüz yüksekliği (Sp) değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 6. Farklı partikül çarpma açısı ile SPE hasarına uğramış TBC'lerin 3D profilometre analizi sonuçları

Şekil 7'de farklı partikül çarpma açılarının Sa değerine etkisi verilmiştir. Elde edilen grafik 1,5 bar püskürtme basıncına ait farklı partikül çarpma açılarında, 170-230 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan TBC kaplamaların 3D profilometre analizi sonucu elde edilen Sa değeri verileridir. Grafikte işlemsiz olarak belirtilen sütun erozyona maruz kalmayan (erozyon öncesi) TBC numunesinin Sa değeri verileridir. Alansal pürüzlülük değerleri ve erozyon oranları arasında doğru

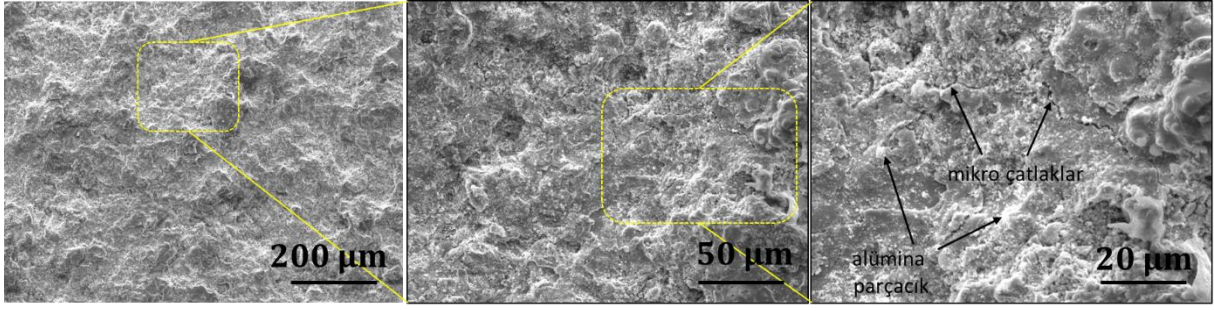
orantılı ilişki olduğu tespit edilmiştir. Yüksek erozyon oranları pürüzlülük değerlerini artırırken, düşük erozyon oranlarının ise azalttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen grafikten de görüleceği üzere en yüksek pürüzlük verisi 50°'lik partikül çarpma açısıyla meydana gelen erozyon oranı sonucu oluşmuştur. Tespit edilen bu sonuç SPE aşınma oranlarında elde edilen sonuçları desteklemektedir. Şekil 6'dan da görüldüğü üzere 50°'lik partikül çarpma açısında alansal pürüzlülük oranları partiküllerin yüzey doyurma ve deformasyon oranına bağlı olarak daha yüksek çıkmaktadır. Minimum değerler 25°'lik partikül çarpma açısında elde edilmesine rağmen SEM görüntülerinde kaplama yüzeyinde çukurlar ve sürekli çatlakların meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 7. Farklı partikül çarpma açılarında erozyona uğramış kaplamaların alansal pürüzlülükleri

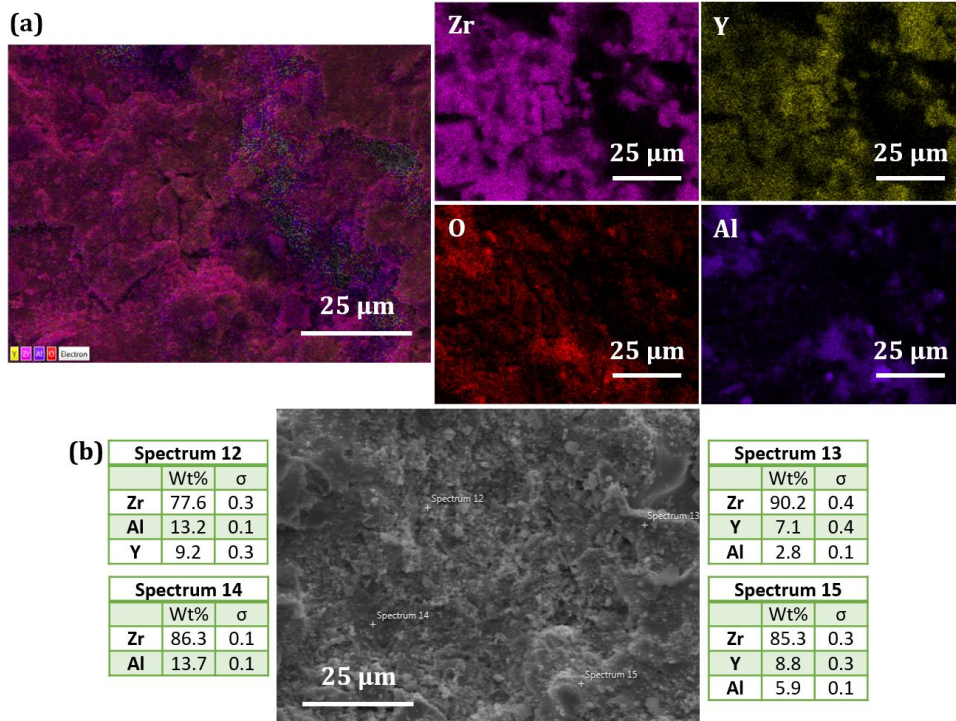
### 3.3. TBC'lerin SPE hasarı sonrası mikroyapısal incelemeleri

Şekil 8'de 25°'lik çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunelerinin 500x, 1.00kx ve 2.00kx büyütme oranlarında alınan mikro yapı üst yüzey görüntüleri verilmiştir. Kaplama yüzeylerinde aşındırıcı partiküllerin çarpma etkisi ile kaplamada mikro çatlak ve gözeneklerin oluştuğu belirgin bir şekilde gözlenmektedir. Aşındırıcı partiküller yoğun bir şekilde kaplamaya nüfus ederek birikmiş ve plastik deformasyona yol açarak yüzeyde tepeciklerin oluşumuna neden olmuştur. Ayrıca düşük çarpma açısında (25°) aşındırıcı partiküller mikro kesme mekanizmaları ile malzeme koparmaktadır. Büyük büyütmede alınan SEM görüntüsünde ise kaplama yüzeyinde çukurların oluştuğu, mikro çatlakların ve aşındırıcı partiküllerin daha belirgin olduğu gözlenmektedir. 25°'lik partikül çarpma açısı ile alınan görüntülerde kaplama yüzeyinde partiküllerin yüzeye çarpması neticesinde pürüzlülüğü yüksek bölgeler gözlenmiştir. Çarpan partikül taneciklerinin kaplama yüzeyinde düzensiz bir morfolojiye neden olduğu belirtilebilir.



Şekil 8. 25°'lik çarpma açısı ile SPE hasarına uğratılan TBC'lerin üst yüzey SEM mikroyapı görüntüleri

Katı partiküllerin temas ettiği yüzeyel bölgeler elementel haritalama analizi görüntülerinde ve EDS analizinde görülmektedir. Şekil 9a'da 25°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunesine ait elementel haritalama analizi verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere TBC numunesinin 25°'lik partikül çarpma açısına maruz kalmasından sonra yüzeyde Zr, Y, Al ve O elementlerinin tespiti yapılmıştır. Buradaki elementel analiz YSZ'den meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Şekil 9b'de elementel haritalama analizine ek olarak gerçekleştirilen üst yüzeyden alınan SEM görüntüsünün noktasal EDS analizi verilmiştir. 25°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunesinin noktasal analizi neticesinde kaplama yüzeyinde olan daha düşük düzeydeki aşınma oranı görülebilmektedir (Şekil 7). 25°'lik partikül çarpma açısı ile gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrası TBC numunelerinin elementel haritalama ve EDS analiz sonuçları incelendiğinde, üretilen TBC'lerin yarı sünek yüzey özellikleri sergilemesi ile ilişki aşındırıcı partiküllerin yüzeye gömülmesi sonucunda yüksek oranda Al elementinin varlığı tespit edilmiştir.

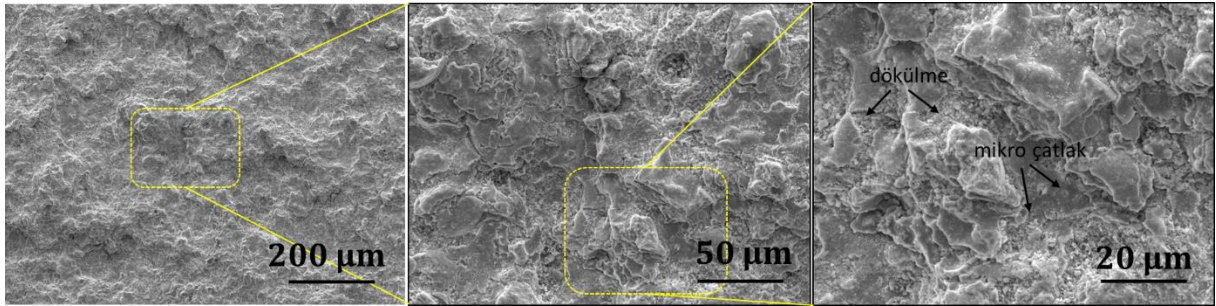


Şekil 9. 25°'lik çarpma açısı ile SPE hasarına uğratılan TBC'lerin SEM analizi sonuçları: a) SEM elementel haritalama sonucu ve b) SEM EDS analizi sonucu

Şekil 10'da 50°'lik çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunelerinin 500x, 1.00kx ve 2.00kx büyütmelerde alınan SEM üst yüzey görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde,

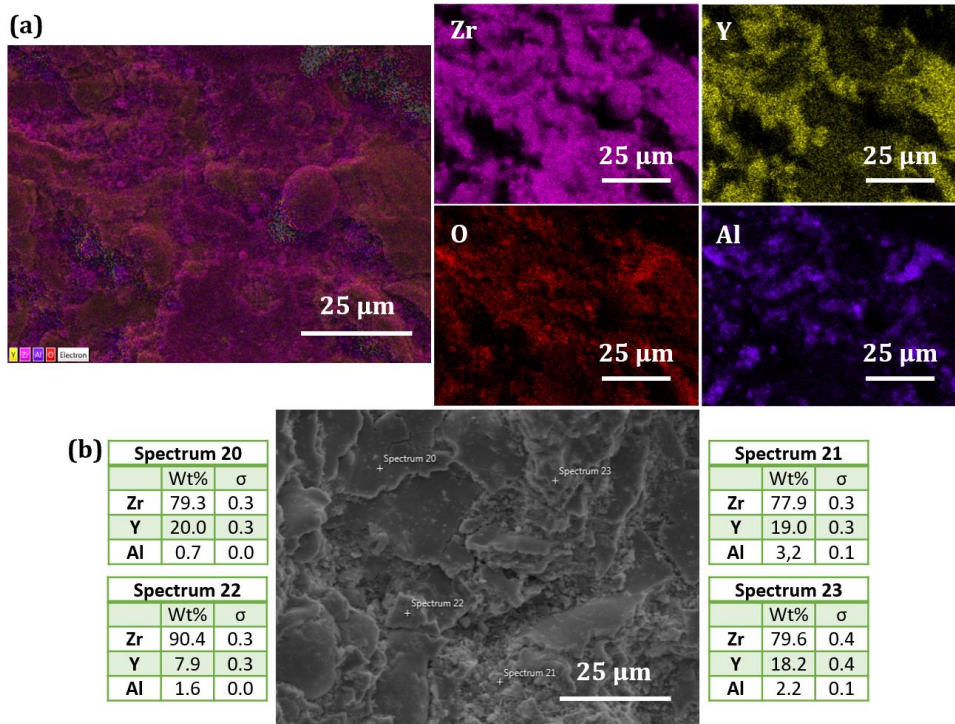


kaplama yüzeyine aşındırıcı partiküllerin kompakt bir şekilde baskı uyguladığı ve kaplama yüzeyinde ağır bir tahribata yol açtığı gözükmemektedir. Dolayısıyla 25°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunesine göre pürüzlü yüksek bir yüzey morfolojiye sahiptir. Yine 25°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunesine benzer mikro çatlaklar, çukur ve oyuklar burada daha belirgin olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, deformasyona maruz kalan kaplama yüzeyinde derin bir çukur oluşmuş ve kaplama yüzeyi tekrarlı aşındırıcı partiküllerin çarpması sonucu malzeme kaybına neden olmuştur. Bu durum Şekil 7'deki erozyon oranı hesaplarını destekler niteliktedir. 50°'lik partikül çarpma açısı ile gerçekleştirilen erozyon aşınmasında diğer çarpma açılara kıyasla en yüksek hasar oranı tespit edilmiştir.



Şekil 10. 50°'lik çarpma açısı ile SPE hasarına uğratılan TBC'lerin üst yüzey SEM mikroyapı görüntüleri

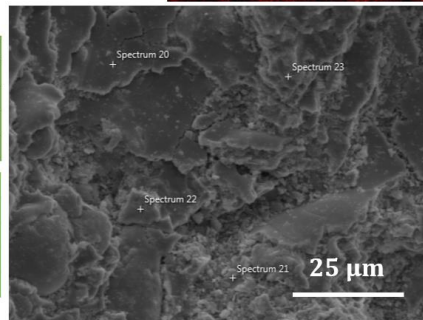
Şekil 11-a'da 50°'lik çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunesine ait elementel haritalama analizi verilmiştir. Üst kaplama yapısını oluşturan YSZ yapısını içeren elementel dağılımlar SEM yüzey mikroyapısı ve haritalamada yer alan mikroyapısal dağılımlardan görülmektedir. Şekil 11-b'de elementel haritalama analizine ek olarak gerçekleştirilen üst yüzeyden alınan SEM görüntüsünün SEM EDS analizi sonucu verilmiştir.



(b)

Spectrum 20		
	Wt%	σ
Zr	79.3	0.3
Y	20.0	0.3
Al	0.7	0.0

Spectrum 22		
	Wt%	σ
Zr	90.4	0.3
Y	7.9	0.3
Al	1.6	0.0

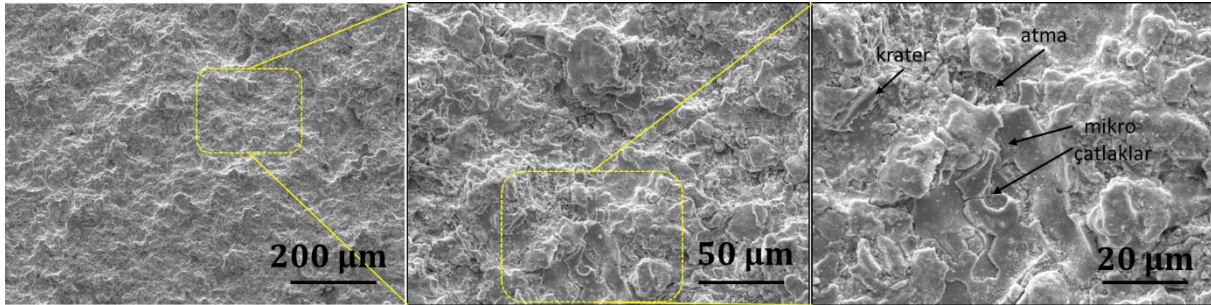


Spectrum 21		
	Wt%	σ
Zr	77.9	0.3
Y	19.0	0.3
Al	3,2	0.1

Spectrum 23		
	Wt%	σ
Zr	79.6	0.4
Y	18.2	0.4
Al	2.2	0.1

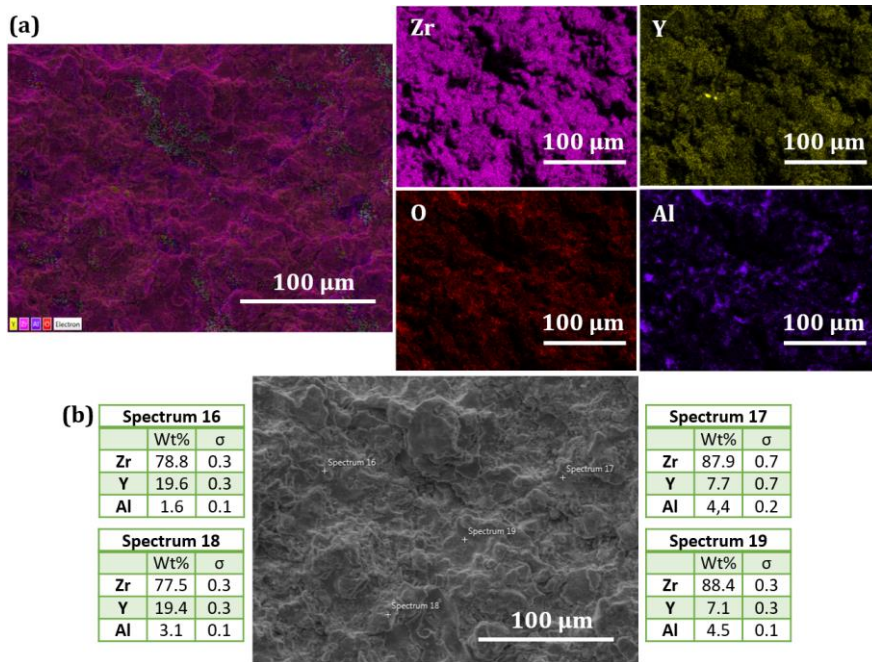
Şekil 11. 50°'lik partikül çarpma açısı ile SPE hasarına uğratılan TBC'lerin SEM analizi sonuçları: a) SEM elementel haritalama sonucu ve b) SEM EDS analizi sonucu

Şekil 12’de 75°’lik çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunelerinin 500x, 1.00kx ve 2.00kx büyütmelemlerde alınan SEM üst yüzey görüntüleri verilmiştir. 75°’lik çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunelerinin SEM mikroyapıları incelendiğinde, 25°’lik çarpma açısı ile aşındırılan kaplama yüzeyiyle benzer hasar mekanizmaları oluştuğunu göstermiştir. Bu durum ticari olarak elde edilen aşındırıcı partikülün kaplama yüzeyine çarpma açısına, püskürtme basıncına, süresine ve vb. deney parametrelerine de bağılı olmaktadır. Katı partikül erozif aşınmada malzeme kaybına sebep olan partiküllerin önemi oldukça fazladır. Eğer aşındırıcı partiküller katı ve sert bir halde ise aşınma türü abrazif karakterdedir. Karşılıklı zorlamalar sonucunda triboloji sistemin elemanları arasında oluşan aşınma birçok mühendislik sistemlerinin performansını etkiler niteliğe sahiptir. Aşındırıcı partiküllerin kaplama yüzeyine püskürtülmesi esnasında birbirlerine çarparak kaplama yüzeyinden malzeme koparmakta ve kütle kaybına sebep olmaktadır. Yüzey derinliği ve genişliği daha düşük izler oluşturmasına rağmen yüzeyde çok sayıda aşındırıcı partiküller rastlanmaktadır ve mikro çatlaklar oluşmuştur.



Şekil 12. 75°’lik çarpma açısı ile SPE hasarına uğratılan TBC’lerin üst yüzey SEM mikroyapı görüntüleri

Şekil 13-a’da 75°’lik çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunesine ait elementel haritalama analizi verilmiştir. Şekil 12-b’de elementel haritalama analizine ek olarak gerçekleştirilen üst yüzeyden alınan SEM görüntüsünün SEM EDS analizi sonucu verilmiştir.



Şekil 13. 75°’lik çarpma açısı ile SPE hasarına uğratılan TBC’lerin SEM analizi sonuçları: a) SEM elementel haritalama sonucu ve b) SEM EDS analizi sonucu

Aşınma izlerinden alınan görüntüler, erozif aşınma oranları ile ilgili yapılan hesaplamalar ile uyum göstermektedir. SPE aşınmasını etkileyen parametrelerden partikül toz türü, kaplama yüzeyine çarpma açısı ile basınç oluşan aşınma mekanizmalarını belirgin şekilde değişmektedir. Çarpma açısına bağlı olarak iz şekillerindeki değişim ele alındığında, partiküllerin kaplama yüzeyine temasında farklılık gösterdiği ve genel bir sonuç olarak karşımıza çıktığı görülmüştür. Dahası partikül geometrisine bağlı olarak iz şekli de değişebilmektedir. Kaplan ve ark. (2018) MCrAlY metalik bağ ve YSZ seramik üst kaplama kullanarak TBC numunelerini üretmişlerdir ve SPE aşınma deneylerini farklı partikül çarpma açılarında gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonrası EDS analiz incelemelerinde yarı sünek davranış sergileyen TBC kaplamaların yüzeyine yüksek oranda (%38,4) aşındırıcı partikül saplandığını tespit etmişlerdir.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme üzerine CoNiCrAlY metalik bağ ve YSZ seramik üst kaplamalar üretilerek SPE aşınma davranışları ve TBC sistemi yapısında oluşan mikroyapısal değişimler incelenmiştir. Çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda yer almaktadır.

- Termal sprej kaplama yöntemlerinden APS yöntemi kullanılarak CoNiCrAlY metalik bağ kaplama ve YSZ seramik üst kaplamaların üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
- TBC kaplamalı numunelerde SPE deneyleri sonrası en yüksek erozyon aşınma oranına 50°'lik çarpma açısında karşılaşılırken, bu değeri sırasıyla 75°'lik çarpma açısı ve 25°'lik çarpma açılarında gerçekleştirilen deneyler takip etmektedir.
- SPE testleri sonrasında SEM mikroyapıları incelendiğinde, kaplama yüzeylerinde çukurların oluşum bulduğu ve sürekli çatlakların meydana geldiği görülmüştür.
- Farklı partikül çarpma açılarında gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrasında, 50°'lik çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunelerinde maksimum erozyon aşınma oranı tespit edilmiştir.
- SPE deneyleri sonrası gerçekleştirilen alansal pürüzlülük ölçümleri incelendiğinde erozyon oranlarının alansal pürüzlülük değerleri ile doğru orantılı olarak artış gösterdiği gözlemlenmiştir.
- Yüksek erozif aşınma oranları, alansal pürüzlülük değerlerini artırırken, düşük erozif aşınma oranlarının alansal pürüzlülük değerlerini azalttığı görülmüştür.
- En yüksek alansal pürüzlülük değerlerine 50°'lik çarpma açısında ulaşılmış ve bu çarpma açısını sırasıyla 75° ve 25° partikül çarpma açılarının takip ettiği görülmüştür.

#### 5. TEŞEKKÜR

Yazarlar, desteklerinden dolayı Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (Proje No: 2021-FEN-A-009) teşekkürü bir borç bilir.

#### 6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## 7. YAZAR KATKISI

Abdullah Cahit KARAOĞLALI ve Derviş ÖZKAN çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, Yasin ÖZGÜRLÜK, Garip ERDOĞAN ve Gülfem BİNAL çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, Garip ERDOĞAN ve Sefa Erdem YILMAZ veri toplama, Derviş ÖZKAN ve Gülfem BİNAL veri analizi ve yorumlama, Sefa Erdem YILMAZ makale taslağının oluşturulması, Abdullah Cahit KARAOĞLALI ve Derviş ÖZKAN fikirsel içeriğin eleştirel incelenmesine katkı sağlamışlardır ve Derviş ÖZKAN, Gülfem BİNAL son onay ve tam sorumluluk kısmında da katkıda bulunmuştur.

## 8. KAYNAKLAR

- Binal G., Isothermal oxidation and hot corrosion behavior of HVOF sprayed 80Ni-20Cr coatings at 750 °C. *Surface and Coatings Technology*, 129141, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129141>
- Cemuschi F., Augello L., Solid Particle Erosion of TBCS: Jet Tester Modeling and Erosion Forecasts. In *Developments in Strategic Materials and Computational Design V: A Collection of Papers Presented at the 38th International Conference on Advanced Ceramics and Composites January 27–31, 2014 Daytona Beach, Florida (Vol. 35, pp. 139-150)*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119040293.ch11>
- Cernuschi F., Guardamagna C., Capelli S., Lorenzoni L., Mack D.E., Moscatelli A., Solid particle erosion of standard and advanced thermal barrier coatings. *Wear*, 348, 43-51, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.10.021>
- Chowdhury M.A., Debnath U.K., Nuruzzaman D.M. Islam M.M., Experimental analysis of aluminum alloy under solid particle erosion process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 230(12), 1516-1541, 2016. <https://doi.org/10.1177/1350650116639466>
- Demirci M., Bagci M., Erosion of ceramic coating applications under the influence of APS and HVOF methods. *Applied Nanoscience*, 12(11), 3409-3415, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02691-4>
- Essa S.K., Chen K., Liu R., Wu X. and Yao M.X., 2021. Failure mechanisms of APS-YSZ-CoNiCrAlY thermal barrier coating under isothermal oxidation and solid particle erosion. *Journal of Thermal Spray Technology*, 30, 424-441, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01124-4>
- Golewski P., Sadowski T., The influence of TBC aging on crack propagation due to foreign object impact. *Materials*, 12(9), 1488, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12091488>
- Kaplan M., Uyaner M., Avcu E., Yildiran Avcu, Y. Karaoğlanlı, A.C., Solid particle erosion behavior of thermal barrier coatings produced by atmospheric plasma spray technique. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 26(19), 1606-1612, 2019. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1444221>
- Karaoğlanlı A.C., Structure and durability evaluation of blast furnace slag coatings and thermal barrier coatings (TBCs) under high temperature conditions. *Surface and Coatings Technology*, 452, 129087, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129087>
- Karaoğlanlı A.C., Grund T., Turk A., Lampke T., A comparative study of oxidation kinetics and thermal cyclic performance of thermal barrier coatings (TBCs). *Surface and Coatings Technology*, 371, 47-67, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.12.082>

- Kumar D., Pandey K.N., Solid particle erosive wear behavior of sol–gel-derived AA2024 thermal barrier coatings. *Surface Review and Letters*, 28(02), 2050051, 2021. <https://doi.org/10.1142/S0218625X20500511>
- Malvi B., Roy M., Elevated Temperature Erosion of Plasma Sprayed Thermal Barrier Coating. *Journal of Thermal Spray Technology*, 30(4), 1028-1037, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01189-9>
- Nomoto H., Solid particle erosion analysis and protection design for steam turbines. In *Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants*, Woodhead Publishing, 219-239, 2017.
- Ozgulruk Y., Doleker K.M., Ahlatci H., Ozkan D., Karaoglanli A.C., The microstructural investigation of vermiculite-infiltrated electron beam physical vapor deposition thermal barrier coatings. *Open Chemistry*, 16(1), 1106-1110, 2018. <https://doi.org/10.1515/chem-2018-0097>
- Özkan D., Karaoğlanlı C. High Entropy Alloys: production, properites and utilization areas. *El-Cezeri*. 8(1): 164-181, 2021. <https://doi.org/10.31202/ecjse.800968>
- Özkan D., MCrAlY İçerikli Bağ Kaplamaya Sahip Termal Bariyer Kaplamaların (TBCs) Mikroyapısal Özelliklerinin ve İzotermal Oksidasyon Davranışının İncelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 25, 1, 331-338, 2022. doi:10.2339/politeknik.885466
- Parlakiyigit A.S., Ozkan D., Oge M., Ozgulruk Y., Doleker K.M., Gulmez T. Karaoglanli A.C., Formation and growth behavior of TGO layer in TBCs with HVOF sprayed NiCr bond coat. *Emerging Materials Research*, 9(2), 451-459, 2020. <https://doi.org/10.1680/jemmr.18.00085>
- Shin D., Hamed A., Influence of micro–structure on erosion resistance of plasma sprayed 7YSZ thermal barrier coating under gas turbine operating conditions. *Wear*, 396, 34-47, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.11.005>
- Wang D.S., Tian Z.J., Yang B., Shen L.D., Preparation and solid particle erosion behaviors of plasma-sprayed and laser-remelted ZrO<sub>2</sub>-7wt.% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thermal barrier coatings. In *Applied Mechanics and Materials* 159, 191-197, 2012. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.159.191>
- Zhang P., Li F., Zhang X., Zhang Z., Tan C., Ren L., Liu M., Effect of bionic unit shapes on solid particle erosion resistance of ZrO<sub>2</sub>-7wt% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thermal barrier coatings processed by laser. *Journal of Bionic Engineering*, 15(3), 545-557, 2018. <https://doi.org/10.1007/s42235-018-0045>
- Zhao X., Liu W., Li C., Yan G., Wang Q., Yang L. Zhou Y., Solid Particle Erosion Behavior of La<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/YSZ Double-Ceramic-Layer and Traditional YSZ Thermal Barrier Coatings at High Temperature. *Coatings*, 12(11), 1638, 2022. <https://doi.org/10.3390/coatings12111638>

---

**Araştırma Makalesi / Research Article**

---

**Optimization of Generalized Certainty Equivalents on the Finite Horizon**

Arnab BASU<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Bilkent University, Department of Industrial Engineering, Ankara, Turkey,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4309-302X>, [arnab@bilkent.edu.tr](mailto:arnab@bilkent.edu.tr)

**Geliş/ Received:** 07.02.2023;

**Kabul / Accepted:** 06.03.2023

**ABSTRACT:** This paper addresses some open issues in optimization of generic certainty equivalents. Such equivalents have been modelled using increasing functionals of the discounted sums of the per-stage unbounded-above cost or reward functions defined on the paths of the underlying controlled Markov chain on general state spaces which models the random dynamics of the system. Examples of such functionals include logarithmic and power utilities as well as the robust Risk-Sensitive preferences among others. The critical results that were obtained were the solutions of this problem for generic unbounded-above per-stage cost minimization and for per stage reward maximization, both satisfying a  $w$ -growth (hence unbounded) condition in the finite horizon setup. In the process, we establish certain nontrivial closure properties of the dynamic programming operators. In addition, we provide a real-life example from Portfolio Consumption.

**Keywords:** Certainty Equivalents, Full-Path Accumulated Setup, Unbounded Rewards and Costs, Discounted Path Sums, Robust or Risk-Sensitive Preferences.

---

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: [arnab@bilkent.edu.tr](mailto:arnab@bilkent.edu.tr)

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Basu, A., (2023). Optimization of Generalized Certainty Equivalents on the Finite Horizon. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 116-133.

## 1. INTRODUCTION

The main motivation of this paper is to address some open issues in optimization of generic (without assuming any specific structure) certainty equivalents which are economic quantities defining the continuation utilities (or costs) in any random dynamic optimization problem from a given time (or stage/period) onwards. Such certainty equivalents have been modelled using increasing functionals of the discounted sums of the generic (only measurability but no continuity assumption) per-stage unbounded above cost or reward functions defined on the paths of the underlying controlled Markov chain on general (Polish) state and action spaces which models the random dynamics of the system. Hence, it includes all usual types of such functions, in particular, the robust risk-sensitive (see, e.g., Hansen and Sargent, 1995; Howard and Matheson, 1972) as well as the usual logarithmic, power etc. functions.

The notion of risk-sensitive preferences in Markov Decision Processes (MDPs) was formally introduced in the seminal paper (Howard and Matheson, 1972) using a stochastic control formulation approach (see also, e.g., (Di Masi and Stettner, 1999), (Jacobson, 1973), (Whittle, 1990) and references therein) though it was first studied by Bellman (Bellman, 1957) (see p. 329 therein). In this criterion, one investigates ‘exponential of integral’ cost or reward which takes into account the attitude of the controller with respect to risk. In an uncertain situation when the total payoff  $Z$  is random, one wishes to select a concave (increasing) utility function  $U(\cdot)$  for reward maximization (convex for cost minimization), depending on a parameter  $\theta > 0$  representing the degree of risk attraction or aversion, which attains the “certainty equivalence”, i.e.,  $EU_\theta(Z) = U_\theta(EZ)$ . This forces  $U_\theta(z) = \frac{1}{\theta} e^{\theta z}$  (see, e.g., Nowak (Nowak, 2005)), wherein the criterion under study becomes of the form  $= \frac{1}{\theta} \ln E[e^{\theta Z}]$ . This quantity  $\theta > 0$  is called the ‘absolute risk-aversion parameter’.

In the recent times, several alternatives of risk measurement have come up based on generic certainty equivalents  $U^{-1}E[U(Z)]$  given general (increasing) forms of the path functional  $U(\cdot)$ . We note that the use of certainty equivalents goes back about a hundred years to the 1930s (see, e.g., (Muliere and Parmigiani, 1993)). A study of the generalization of risk-sensitive preferences in MDP setup to generic certainty equivalents in the above sense was recently undertaken in (Bäuerle and Rieder, 2014) by implementing the corresponding utility as a ‘full-path accumulated’ functional of the underlying random dynamical system, namely, as a certainty equivalent of the time-separable additive von Neumann-Morgenstern discounted utility on the entire (finite or infinite) time horizon. Therein, the authors considered a discrete-time MDP on a Borel state space with bounded one-stage costs over the finite time horizon with general increasing  $U(\cdot)$  and on the infinite horizon with  $U(\cdot)$  increasing and either concave or convex.

On the other hand, the economics literature followed a ‘per-stage recursive’ robustness approach using the notion of risk-sensitivity as formulated by (Hansen and Sargent, 1995) (see also (Hansen et al., 2006), (Hansen and Sargent, 2007) and (Hansen and Sargent, 2008)), namely, as a sum of the current (per-stage) reward and the one-step discounted certainty equivalent of the future (next-stage) continuation utility wherein this certainty equivalent is computed using a similar concave transformation. The generic form of such a recursive approach was first introduced by (Kreps and Porteus, 1978) and (Kreps and Porteus, 1979) for the infinite horizon and later extended by (Epstein and Zin, 1989) to the infinite horizon. Using the terminology introduced in the recent paper (Basu et al., 2022), we call the robustness framework of (Hansen and Sargent, 1995) as the “per-stage recursive” approach whereas, again as therein, the corresponding original framework of (Howard and Matheson, 1972) is referred to as the “full-path accumulated” approach. These per-stage recursive

preferences have been studied extensively in recent years primarily in the context of their connection to robustness analysis for economic model misspecifications (see, e.g., (Anderson et al., 2012; Hansen and Sargent, 2007)), precautionary savings for life-cycle preferences under monotone risk aversion (see, e.g., (Bommier, 2013; Bommier et al., 2017; Bommier and Le Grand, 2019)), climate risk modelling for optimal carbon control (see, e.g., (Bommier et al., 2015; Cai and Lontzek, 2019)) and risk measures in asset pricing/portfolio optimization (see, e.g., (Bäuerle and Jaskiewicz, 2018; Bielecki and Pliska, 2003; Epstein and Zin, 1991; Tallarini, 2000)) among other areas.

Whereas the applications of the per-stage recursive framework have been so diverse and many, the solutions obtained in a vast majority of the above cases (which mainly involved nonlinear certainty equivalents) have been somewhat heuristic and sometimes without formal mathematical justification as to their existence and uniqueness. Whatever formal methods had been deployed were majorly for the linear case which lead to the standard additive von Neumann-Morgenstern preference and the generic nonlinear cases were left open, e.g., preference maximization problems for multiplicative or exponential functionals. Only recently, some formal results in this direction were obtained for a specific problem of stochastic optimal growth (see (Bäuerle and Jaskiewicz, 2018)) under certain growth and stability assumptions on the system. However, to the best of our knowledge, the generic nonlinear case is still largely open.

The only work that endeavoured to address this nonlinear setup albeit in the full-path accumulated setup for cost minimization is the paper by (Bäuerle and Rieder, 2014). This present paper is in some sense the technical successor to (Bäuerle and Rieder, 2014) and aims to address the some of the open issues mentioned therein. Notably, (Bäuerle and Rieder, 2014) made certain strong assumptions on the boundedness of per-stage cost or reward function which usually fail to hold in the real-life scenarios described in the above references. Our paper attempts to address these issues and create an extended optimization theory for certainty equivalents modelled using generic increasing functionals of the discounted path-sums of the unbounded-above per-stage functions defined on general state spaces.

Our main technical contribution is to solve this optimization problem in the finite horizon case for per-stage unbounded costs/rewards satisfying a  $w$ -growth condition (see Theorem 3.2 and Corollary 3.3 in Section 3). In the process, a result of much broader (beyond our setup here) potential applicability have been proved, namely, certain important closure properties of the dynamic programming (Bellman) operators, the compactness of optimal action (sub)sets and the corresponding existence of optimizing selectors in Theorem 3.1 in Section 3. We also provide a real-life example from Portfolio Consumption Model to illustrate our ideas (see Proposition 4.3 in Section 4). We choose such a portfolio model as an example because such models are extremely important in business and finance and have regularly been used as canonical examples in certainty equivalent formulations. Hence, we believe that such an example would best serve our purpose of illustration.

We now describe the structure of the paper. Section 2 describes the problem setup as well as clarifies the main technical formulations, notations and assumptions. Section 3 proves a very crucial result, namely Theorem 3.1 involving the closure properties of the underlying dynamic programming operator and then proceeds to the proves the finite horizon results in Theorem 3.2 and Corollary 3.3 for unbounded per-stage functions satisfying a  $w$ -growth condition. Section 4 provides a nontrivial application of the obtained results to a real-life Portfolio Consumption problem (see Proposition 4.3). We end with Section 5 which provides some pointers to future directions of work as technical continuation of this work and, in the process, discuss some limitations of this paper.



## 2. PROBLEM DESCRIPTION

For a metric space  $S$ , let  $\mathcal{B}(S)$  denote the Borel  $\sigma$ -algebra on  $S$ ,  $\mathcal{C}_b(S)$  the set of bounded continuous real functions on  $S$  endowed with the uniform/sup norm  $\|\cdot\|$ ,  $\mathcal{P}(S)$  denote the set of probability measures on  $(S, \mathcal{B}(S))$  endowed with the Prohorov topology (see, e.g., (Borkar, 1995)), i.e., the topology of weak convergence implying, a sequence  $\mathcal{P}(S) \supset \{\mu_n\}_{n \geq 1} \xrightarrow{w} \mu \in \mathcal{P}(S)$ ,

$$\int_S f(x)\mu_n(dx) \xrightarrow{n \uparrow \infty} \int_S f(x)\mu(dx), \quad \forall f \in \mathcal{C}_b(S). \tag{2.1}$$

Defining  $\bar{\mathbb{R}} \stackrel{def}{=} \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ ,  $\mathbb{R}_+ \stackrel{def}{=} \{x \in \bar{\mathbb{R}} : x \geq 0\}$ ,  $\mathbb{R}_- \stackrel{def}{=} \{x \in \bar{\mathbb{R}} : x \leq 0\}$ , let  $f : Y \mapsto \bar{\mathbb{R}}$  for a Borel subset  $Y$  of some Polish space. For  $\lambda \in \bar{\mathbb{R}}$ , consider the level-sets

$$\underline{D}_f(\lambda; Y) \stackrel{def}{=} \{y \in Y : f(y) \leq \lambda\}, \quad \bar{D}_f(\lambda; Y) \stackrel{def}{=} \{y \in Y : f(y) \geq \lambda\}. \tag{2.2}$$

We call  $f$  lower-semicontinuous (l.s.c) on  $Y$  if all such level-sets  $\underline{D}$  are closed and inf-compact on  $Y$  if they are compact. Similarly,  $f$  is upper-semicontinuous (u.s.c) if all such  $\bar{D}$  are closed and sup-compact if they are compact. Note that if  $f$  is l.s.c (resp. inf-compact) then  $-f$  is u.s.c (resp. sup-compact). Consider a discrete-time Markov Decision Process (MDP) with state space  $\mathcal{X}$  (Borel subset of a Polish space), action space  $\mathcal{A}$  (Borel subset of a Polish space) with  $\emptyset \neq \mathcal{A}(x) \subseteq \mathcal{A}$  being the Borel set of actions available at  $x \in \mathcal{X}$ , one-step measurable bounded-below cost function:

$(x, a) \in Gr(\mathcal{A}) \stackrel{def}{=} \{(x, a) : x \in \mathcal{X}, a \in \mathcal{A}(x)\} \mapsto c(x, a) \leq +\infty$ , one-step measurable bounded below reward/utility function  $r : (x, a) \in Gr(\mathcal{A}) \mapsto r(x, a) \leq +\infty$ , and, weakly-continuous transition kernels (laws)  $q(\cdot | x; a) \in P(\mathcal{X})$  i.e.

$$\mathcal{X} \times \mathcal{A} \ni (x, a) \mapsto \int_{\mathcal{X}} f(x')q(dx'|x, a) \text{ is continuous } \forall f \in \mathcal{C}_b(\mathcal{X}) \tag{2.3}$$

Such that  $q(B | \cdot, \cdot)$  is Borel on  $Gr(\mathcal{A})$  for all  $B \in \mathcal{B}(\mathcal{X})$ . We assume, as usual, that  $Gr(\mathcal{A})$  is a measurable subset of  $\mathcal{X} \times \mathcal{A}$  i.e.  $Gr(\mathcal{A}) \in \mathcal{B}(\mathcal{X} \times \mathcal{A})$ . We say that a sequence of real-valued functions  $\{f_n\}_{n=1,2,\dots}$  defined on  $\mathcal{X}$  is lower semiequicontinuous at a point  $x \in \mathcal{X}$  if for each  $\epsilon > 0$  there exists a  $\delta_\epsilon > 0$  such that for all points  $x' \in B_{\delta_\epsilon}(x)$  ( $\delta_\epsilon$ -neighborhood of the point  $x$ ) we have that  $f_n(x') > f_n(x) - \epsilon$  for all  $n = 1, 2, \dots$  (Feinberg et al., 2020, Definition 3.3). This sequence  $\{f_n\}_{n=1,2,\dots}$  is said to be lower semiequicontinuous on  $\mathcal{X}$  if it is so at all  $x \in \mathcal{X}$ . Analogously, a sequence of real-valued functions  $\{f_n\}_{n=1,2,\dots}$  defined on  $\mathcal{X}$  is called upper semiequicontinuous at a point  $x \in \mathcal{X}$  if the sequence  $\{-f_n\}_{n=1,2,\dots}$  is lower semiequicontinuous at that point  $x \in \mathcal{X}$ . Also, we say that a sequence of measurable function  $\{f_n : \mathcal{X} \rightarrow \bar{\mathbb{R}}\}_{n=1,2,\dots}$  lower semiconverges (see (Feinberg et al., 2020), Definition 3.2) to a measurable function  $f_n : \mathcal{X} \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$  in some measure  $\mu$  on  $\mathcal{B}(\mathcal{X})$  if, for each  $\epsilon > 0$ , we have,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mu(\{x \in \mathcal{X} : f_n(x) \leq f(x) - \epsilon\}) = 0. \tag{2.4}$$

Accordingly, upper semiconvergence is defined as the situation when  $\{-f_n\}_{n=1,2,\dots}$  lower semiconverges to  $-f$  or equivalently when,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mu (\{x \in \mathcal{X} : f_n(x) \geq f(x) + \epsilon\}) = 0. \tag{2.5}$$

The decision system moves as follows:

1. at each time  $t \in \mathbb{N}_0 \stackrel{\text{def}}{=} \{0,1, \dots, \}$  the current state  $x \in \mathcal{X}$  is observed,
2. the decision maker chooses an action  $a \in A(x)$ ,
3. the cost  $c(x, a)$  or reward  $r(x, a)$  is incurred, and,
4. the system moves to the next state according to probability  $q(\cdot | x, a)$  at the next time  $t + 1$  and repeats itself till finite or infinite time  $0 < T \leq \infty$ .

We denote the set of histories up to and including time  $t$  as  $\mathcal{H}_t \stackrel{\text{def}}{=} (\mathcal{X} + \mathcal{A})^t \times \mathcal{X}$  with  $\mathcal{B}(\mathcal{H}_t) = (\mathcal{B}(\mathcal{X}) \otimes \mathcal{B}(A))^t \otimes \mathcal{B}(\mathcal{X})$ . A history-dependent (behavioural) policy  $\pi \stackrel{\text{def}}{=} \{\pi_t\}_{t \in \mathbb{N}_0}$  is a sequence of (measurable) maps  $\pi_t: \mathcal{H}_t \rightarrow A$  such that  $\pi_t(h_t) \in A(x_t)$  where  $\mathcal{H}_t \ni h_t \stackrel{\text{def}}{=} \{x_0, a_0, x_1, a_1, \dots, x_{t-1}, a_{t-1}, x_t\}$  is a history up to and including time,  $t$ . Let  $\Pi$  denote the set of all such policies. A policy  $\phi \stackrel{\text{def}}{=} \{\phi_t\}_{t \in \mathbb{N}_0} \in \Pi$  is called Markov if all decisions depend on the current state only i.e. each  $\phi_t: \mathcal{X} \rightarrow A$  and is measurable such that  $\phi_t(x) \in A(x)$  for all  $x \in \mathcal{X}$ . Denote by  $\Pi^M$  the set of Markov policies. A Markov policy  $\phi$  is called stationary (Markov) if  $\phi_t \equiv \phi$  (repeating notation) for some measurable map  $\phi: \mathcal{X} \rightarrow A$  such that  $\phi(x) \in A(x)$  for all  $x \in \mathcal{X}$ . Denote by  $\Pi^S$  the set of stationary policies. The Ionescu-Tulcea theorem (see, e.g., (Bertsekas and Shreve, 1996), Proposition 7.28) implies that, for each initial state  $x \in \mathcal{X}$  and policy  $\pi \in \Pi$ , there exists an unique probability measure  $P_x^\pi$  and a stochastic process  $(X_t, A_t)$  on the set of all histories (trajectories)  $\mathcal{H}_\infty \stackrel{\text{def}}{=} (X \times A)^\infty$  endowed with the product  $\sigma$ -algebra such that  $X_t(h_\infty) = x_t$  is the (random) state and  $A_t(h_\infty) = a_t$  is the (random) action at time  $t$  for  $h_\infty \in \mathcal{H}_\infty$ . Denote by  $E_x^\pi$  the corresponding expectation.

Let  $U: \mathbb{R}_+ \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  be continuous, unbounded and strictly increasing function such that  $U^{-1}$  exists. This function  $U$  shall be used to define overall costs or utilities in our setup as described below. For a finite-horizon  $T \in \mathbb{N}_0$  and under a policy  $\pi \in \Pi$  define the general certainty equivalent cost/utility criterion as

$$V_{T,\beta}^\pi(x) \stackrel{\text{def}}{=} U^{-1} (E_x^\pi [U (F_\beta^T)]) , x \in \mathcal{X}, \tag{2.6}$$

where  $\beta \in (0, 1]$  is the discount factor,  $F_\beta^t \equiv C_\beta^t \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{s=0}^{t-1} \beta^s c(X_s, A_s)$  for cost and  $F_\beta^t \equiv R_\beta^t \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{s=0}^{t-1} \beta^s r(X_s, A_s)$  for reward for  $t \geq 1$ . In particular, for our finite horizon case  $t = T$ . For the undiscounted case, i.e.  $\beta = 1$ , we write  $V_{T,\beta=1}^\pi \equiv V_T^\pi$ . Similarly, for the infinite horizon ( $T = \infty$ ), define the corresponding cost/utility criteria as,

$$V_\beta^\pi(x) \stackrel{\text{def}}{=} U^{-1} (E_x^\pi [U (F_\beta^\infty)]) , x \in \mathcal{X}, \tag{2.7}$$

where  $F_\beta^\infty \stackrel{\text{def}}{=} C_\beta^{T=\infty} = \sum_{t=0}^\infty \beta^t c(X_t, A_t)$  for cost,  $F_\beta^\infty \stackrel{\text{def}}{=} R_\beta^{T=\infty} = \sum_{t=0}^\infty \beta^t r(X_t, A_t)$  for reward. For any of the above costs  $\underline{g}^\pi(x) = V_{T,\beta}^\pi(x)$  (without  $\beta$  for  $\beta = 1$ ) or  $V_\beta^\pi(x)$  define the optimal cost as

$$\underline{g}(x) \stackrel{\text{def}}{=} \inf_{\pi \in \Pi} \underline{g}^\pi(x), \quad x \in \mathcal{X}. \tag{2.8}$$

Similarly, for any of the above utilities  $\bar{g}^\pi(x) = V_{T,\beta}^\pi(x)$  (without  $\beta$  for  $\beta = 1$ ) or  $V_\beta^\pi(x)$  define the optimal utility as

$$\bar{g}(x) \stackrel{\text{def}}{=} \sup_{\pi \in \Pi} \bar{g}^\pi(x), \quad x \in \mathcal{X}. \tag{2.9}$$

A policy  $\pi^* \in \Pi$  is said to be optimal for the corresponding cost (resp. utility) criterion if  $\underline{g}^{\pi^*}(x) = \underline{g}^\pi(x)$ . (resp.  $\bar{g}^{\pi^*}(x) = \bar{g}(x)$ ) for all  $x \in \mathcal{X}$ . The following Remark 1 is of relevance here.

**Remark 1.** Given a strategy  $\pi \in \Pi$  with an initial state  $x \in \mathcal{X}$  and a real-valued random variable  $Y$  defined on the probability space  $(\mathcal{H}_\infty, B(\mathcal{H}_\infty), P_x^\pi)$  and assuming sufficient regularity for  $U$  as given above, we see, by Taylor Expansion, that

$$U^{-1}(E_x^\pi[U(Y)]) \approx E_x^\pi[Y] - \frac{1}{2} \mathcal{AP}(E_x^\pi[Y]) \text{Var}[Y] \tag{2.10}$$

where  $\mathcal{AP}(y) \stackrel{\text{def}}{=} -\frac{U''(y)}{U'(y)}$  is the ‘Arrow-Pratt’ function of absolute risk-aversion assuming that  $U$  is sufficiently regular. Note that  $\mathcal{AP}$  term above defines the variability (see, e.g., (Bielecki and Pliska, 2003)). If  $U$  is concave then the variance is subtracted and the decision-maker becomes risk-seeking for cost minimization instead becoming risk-averse if  $U$  is convex as, in this case, the variance is added. These interpretations are reversed for reward maximization problems.

The point-to-set map  $\mathcal{X} \ni x \rightarrow \mathcal{A}(x)$  is called upper-semicontinuous in the sense of Kuratowski (u.s.c-K) if  $\mathcal{X} \ni x_n \rightarrow x \in \mathcal{X}$  and  $a_n \in \mathcal{A}(x_n)$  for  $n \in \mathbb{N}$  then  $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  has a limit point  $a \in \mathcal{A}(x)$ . Before proceeding further, we make an assumption on the one-step cost / reward function  $c(\cdot, \cdot), r(\cdot, \cdot)$  below.

**Assumption (A):**

1. There exists a measurable function  $w : \mathcal{X} \rightarrow [\underline{\ell}, \infty)$ , a measurable subset  $\mathcal{C} \subset \mathcal{X}$ , constants  $0 < \rho < 1, 0 < \underline{\ell} \leq 1, c' \geq \underline{\ell}, c'(1 - \rho) \geq b > 0$  and  $d \geq \frac{c'^2}{\underline{\ell}}$  such that,

$$\int_{\mathcal{X}} w(x') q(dx'|x, a) \leq \rho w(x) + b \mathbf{1}_{\mathcal{C}}(x), \quad (x, a) \in Gr(\mathcal{A})$$

$$\text{with } \sup_{x \in \mathcal{C}} w(x) = c' < \infty \text{ and } \inf_{x \in \mathcal{C}} w(x) = \max\left\{ \frac{c' + d}{(1 - \rho)\frac{d}{b} + 1}, \underline{\ell} \right\} \leq c'. \tag{2.11}$$

2. For each  $x \in \mathcal{X}$  there exists some  $a \in \mathcal{A}(x)$  such that  $c(x, a) < \infty$  i.e. the situation  $c(x, a) = \infty$  for all  $(x, a) \in Gr(\mathcal{A})$  is excluded as it is trivial in that all actions are bad.

3. The map  $\mathcal{X} \ni x \rightarrow \mathcal{A}(x) \subset \mathcal{A}$  is u.s.c and compact-valued.
4. This part has two alternatives:
  - (a) For the cost minimization problem (2.8) :  $c$  is l.s.c and for all  $(x, a) \in \text{Gr}(\mathcal{A})$ ,  $c(x, a) \geq 0$  and  $c(x, a) \leq dw(x)$  for  $d$  as in Assumption A(1) below.
  - (b) For the utility maximization problem (2.9):  $r$  is u.s.c and for all  $(x, a) \in \text{Gr}(\mathcal{A})$ ,  $r(x, a) \geq 0$  and  $r(x, a) \leq dw(x)$  where, without loss of generality,  $d$  is same as above.

We state the following Remark in regard to the above Assumption (A).

**Remark 2.** This Assumption (A) is fairly standard in the literature for general state and action spaces (see, e.g, (Bauerle and Rieder, 2014; (Bauerle and Jaskiewicz, 2018)) and can usually be shown to be satished in all real-life applications. Assumption A(1) above, referred to as the “drift inequality” (stochastic Lyapunov-type stability condition), and A(4) above, referred to as the “ $w$ -growth condition” on the cost or reward function, have been widely used in the MDP and economic literature, e.g., (Altman et al., 1997; Bauerle and Jaskiewicz, 2018; Meyn and Tweedie, 2009; Nowak and Altman, 2002). Note it is easy to see that, without loss of generality, we can choose the same set of parameters (namely,  $\rho, b, c', d$ ), the same set  $C$  and the same growth function  $w(\cdot)$  for both  $c$  and  $r$  in Assumption (A) above. Finally, it should be noted that the following always holds true for any  $d > 0$ :

$$\frac{c' + d}{(1 - \rho)^{\frac{d}{b}} + 1} \begin{cases} = c' & 0 < b = c'(1 - \rho), \\ < c' & 0 < b < c'(1 - \rho). \end{cases} \tag{2.12}$$

For a measurable function  $f: \mathcal{X} \times \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}_+$  we define the  $w$ -norm as follows:

$$\|f\|_w \stackrel{def}{=} \sup_{x \in \mathcal{X}, a \in \mathcal{A}(x)} \frac{f(x, a)}{w(x)}. \tag{2.13}$$

Note that, in this notation above, by Assumption A(4), we have  $\|c\|_w, \|r\|_w \leq d$ . As explained in the text following the proof of Lemma 2 in (Feinberg, et al., 2012), it follows that there exists a measurable map  $\phi : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{A}$  such that  $\phi(x) \in \mathcal{A}(x)$  for all  $x \in \mathcal{X}$  i.e. there exists a (measurable) selector. Since, as explained above, we identify stationary policies with a selector they are the same objects and thus the existence of a selector is a necessary and sufficient condition for the existence of a policy. Again, as explained therein, it is possible that  $c(x, a) = \infty$  for some  $(x, a) \in \text{Gr}(\mathcal{A})$  and then, from a modelling perspective, this state-action pair should be excluded as there is no further reason to optimize once such a pair is reached/selected. So, we can exclude such a situation when  $c$  is identically  $\infty$  as we did in Assumption A(2).

We now proceed to the solutions of (2.8) and (2.9) for the various cost or reward functions (as described above) in the next section.

### 3. FINITE HORIZON PROBLEM

In this section we consider the optimization problems (2.8) and (2.9) for the cost/utility function (2.6) with  $\beta \in (0, 1)$ . Since  $U$  is strictly increasing so is  $U^{-1}$  and we can consider the problems (2.8)

and (2.9) (resp.) by removing  $U^{-1}$  from (2.6) and considering the following equivalent problems (resp.).

$$\underline{v}_{T,\beta}(x) \stackrel{def}{=} \inf_{\pi \in \Pi} E_x^\pi [U(C_\beta^T)], \quad \bar{v}_{T,\beta}(x) \stackrel{def}{=} \sup_{\pi \in \Pi} E_x^\pi [U(R_\beta^T)] \quad (3.1)$$

for  $x \in \mathcal{X}$ . To proceed, we define (as in (Bauerle and Rieder, 2014)) a MDP on the enhanced state space  $\hat{\mathcal{X}} \stackrel{def}{=} \mathcal{X} \times \mathbb{R}_+ \times (0, 1]$ , corresponding per-stage cost zero and action space  $\mathcal{A}$  with the selectors now being measurable maps  $\phi: \hat{\mathcal{X}} \rightarrow \mathcal{A}$  such that  $\hat{\mathcal{X}} \ni (x, y, z) \rightarrow \phi(x, y, z) \in \mathcal{A}(x)$ . We denote by  $\Phi$  the set of selectors. Policies are then defined as in the previous section. For  $t \in \mathbb{N}$  we define, for  $(x, y, z) \in \hat{\mathcal{X}}$

$$\underline{v}_{t\pi}(x, y, z) \stackrel{def}{=} E_x^\pi [U(zC_\beta^t + y)], \quad \pi \in \Pi, \quad \underline{v}_t(x, y, z) \stackrel{def}{=} \inf_{\pi \in \Pi} \underline{v}_{t\pi}(x, y, z),$$

and

$$\bar{v}_{t\pi}(x, y, z) \stackrel{def}{=} E_x^\pi [U(zR_\beta^t + y)], \quad \pi \in \Pi, \quad \bar{v}_t(x, y, z) \stackrel{def}{=} \sup_{\pi \in \Pi} \bar{v}_{t\pi}(x, y, z) \quad (3.2)$$

with terminal cost / utility  $\underline{v}_0(x, y, z) = \bar{v}_0(x, y, z) = v_0(x, y, z) \equiv U(y)$  where, as in (Kreps, 1977a) and (Kreps, 1977b),  $y$  summarizes the cost or reward that has been accumulated so far and  $z$  is a new state variable introduced to keep track of discounting. The corresponding transition kernel  $\tilde{q}(d(x', y', z')|x, y, z, a) \equiv q(dx'|x, a) \otimes \mathbf{1}_{(zf(x,a)+y)}(dy') \otimes \mathbf{1}_{z\beta}(dz')$  is defined as:

$$\begin{aligned} & \int_{\hat{\mathcal{X}}} v(x', y', z') \tilde{q}(d(x', y', z')|x, y, z, a) \\ &= \int_{\hat{\mathcal{X}}} v(x', y', z') q(dx'|x, a) \otimes \mathbf{1}_{(zf(x,a)+y)}(dy') \otimes \mathbf{1}_{z\beta}(dz') \\ &= \int_{\mathcal{X}} v(x', zc(x, a) + y, z\beta) q(dx'|x, a) \end{aligned} \quad (3.3)$$

where  $f = c, r$  as the case may be.

We wish to obtain  $v_T(x, 0, 1) = \underline{v}_{T,\beta}(x), \bar{v}_{T,\beta}(x)$  with the cost/utility interpretation as required. To this end, we define,

$$\mathcal{W} \stackrel{def}{=} \left\{ f : \hat{\mathcal{X}} \mapsto \mathbb{R}_+ :: f \text{ is measurable and } f(x, y, z) \leq (d + b\mathbf{1}_C(x))w(x) \right.$$

for  $(x, y, z) \in \hat{\mathcal{X}} \left. \right\},$

$$\mathcal{L}'(\hat{\mathcal{X}}) \stackrel{def}{=} \left\{ f : \hat{\mathcal{X}} \mapsto \mathbb{R}_+ :: f \text{ is l.s.c, } f(x, \cdot, \cdot) \text{ is continuous, non-decreasing for } x \in \mathcal{X} \right.$$

and  $f(x, y, z) \geq U(y)$  for  $(x, y, z) \in \hat{\mathcal{X}} \left. \right\},$

$$\mathcal{L}(\hat{\mathcal{X}}) \stackrel{def}{=} \mathcal{L}'(\hat{\mathcal{X}}) \cap \mathcal{W},$$

$$\mathcal{U}'(\hat{\mathcal{X}}) \stackrel{def}{=} \left\{ f : \hat{\mathcal{X}} \mapsto \mathbb{R}_+ :: f \text{ is u.s.c, } f(x, \cdot, \cdot) \text{ is continuous, non-decreasing for } x \in \mathcal{X} \right.$$

and  $f(x, y, z) \geq U(y)$  for  $(x, y, z) \in \hat{\mathcal{X}} \left. \right\},$

$$U(\hat{\mathcal{X}}) \stackrel{def}{=} U'(\hat{\mathcal{X}}) \cap \mathcal{W}. \tag{3.4}$$

Note that, without loss of generality, we can choose the same  $w, d$  as in Assumption (A) above. For  $v \in \mathcal{L}'(\hat{\mathcal{X}})$  or  $U'(\hat{\mathcal{X}})$ ,  $\phi \in \Phi$ ,  $(x, y, z) \in \hat{\mathcal{X}}$  and  $a \in \mathcal{A}$  define

$$\begin{aligned} \eta_f[v](x, y, z, a) &\stackrel{def}{=} \int_{\mathcal{X}} v(x', z f(x, a) + y, z\beta) q(dx'|x, a), \quad f = c, r, \\ Gr_{\hat{\mathcal{X}}}(\mathcal{A}) &\stackrel{def}{=} \{(x, y, z, a) : (x, y, z) \in \hat{\mathcal{X}}, a \in \mathcal{A}(x)\} \subseteq \hat{\mathcal{X}} \times \mathcal{A} \end{aligned} \tag{3.5}$$

and

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{\phi}^f[v](x, y, z) &\stackrel{def}{=} \eta_f[v](x, y, z, \phi(x, y, z)), \quad f = c, r \\ \underline{\mathbf{T}}[v](x, y, z) &\stackrel{def}{=} \inf_{a \in \mathcal{A}(x)} \eta_c[v](x, y, z, a), \quad v \in \mathcal{L}'(\hat{\mathcal{X}}), \\ \overline{\mathbf{T}}[v](x, y, z) &\stackrel{def}{=} \sup_{a \in \mathcal{A}(x)} \eta_r[v](x, y, z, a), \quad v \in U'(\hat{\mathcal{X}}). \end{aligned} \tag{3.6}$$

**Remark 3.** For  $\mathbf{T} = \underline{\mathbf{T}}, \overline{\mathbf{T}}$  or  $\mathbf{T} \in \{\mathbf{T}_{\phi}^f, \phi \in \Phi\}$  are monotone operators in the sense that for  $v_1, v_2 \in \mathcal{L}'(\hat{\mathcal{X}})$  or  $U'(\hat{\mathcal{X}})$  with  $v_1 \leq v_2$  it is true that  $\mathbf{T}[v_1] \leq \mathbf{T}[v_2]$ .

We now state and prove a very important result which shall form one of the key foundations of this paper.

Theorem 3.1. Under the Assumption (A) in Section 2 above, we have,

1. Given  $v \in U(\hat{\mathcal{X}})$ ,  $\overline{\mathbf{T}}v \in U(\hat{\mathcal{X}})$  the supremum in (3.6) can be replaced by a maximum, i.e.

$$\overline{\mathbf{T}}[v](x, y, z) = \max_{a \in \mathcal{A}(x)} \eta_r[v](x, y, z, a), \tag{3.7}$$

the set of maximizers  $A^*(x, y, z) \stackrel{def}{=} \{a \in \mathcal{A}(x) : \eta_r[v](x, y, z, a) = \overline{\mathbf{T}}[v](x, y, z)\}$  is nonempty compact and there exists a corresponding maximizing selector i.e.  $\phi^* \in \Phi$  such that,

$$\overline{\mathbf{T}}[v](x, y, z) = \mathbf{T}_{\phi^*}^r[v](x, y, z) = \eta_r[v](x, y, z, \phi^*(x, y, z)), \quad (x, y, z) \in \hat{\mathcal{X}}. \tag{3.8}$$

2. Given  $v \in \mathcal{L}(\hat{\mathcal{X}})$ ,  $\underline{\mathbf{T}}[v] \in \mathcal{L}(\hat{\mathcal{X}})$ , the infimum in (3.6) can be replaced by a minimum i.e.

$$\underline{\mathbf{T}}[v](x, y, z) = \min_{a \in \mathcal{A}(x)} \eta_c[v](x, y, z, a), \tag{3.9}$$

the set of minimizers  $A^*(x, y, z) \stackrel{def}{=} \{a \in \mathcal{A}(x) : \eta_c[v](x, y, z, a) = \underline{\mathbf{T}}[v](x, y, z)\}$  is nonempty compact and there exists a corresponding minimizing selector i.e.  $\phi^* \in \Phi$  such that

$$\underline{\mathbf{T}}[v](x, y, z) = \mathbf{T}_{\phi^*}^c[v](x, y, z) = \eta_c[v](x, y, z, \phi^*(x, y, z)), \quad (x, y, z) \in \hat{\mathcal{X}}. \tag{3.10}$$

**Proof:** We prove Part 1 of the above Theorem 3.1. The proof of Part 2 is exactly analogous. Let us prove that the function  $\eta_r[v](x, y, z, a)$  is u.s.c. Consider a converging sequence  $(x_n, y_n, z_n, a_n) \rightarrow (x, y, z, a)$  as  $n \rightarrow \infty$ . Let  $v \in U(\hat{\mathcal{X}})$ . We define the functions  $f(\cdot) \stackrel{\text{def}}{=} v(\cdot, zr(x, a) + y, z\beta)$  and  $f_n(\cdot) \stackrel{\text{def}}{=} v(\cdot, z_n r(x_n, a_n) + y_n, z_n \beta)$ , where  $n = 1, 2, \dots$ . Since the functions  $v, r$  are u.s.c and  $v(x, \cdot, \cdot)$  is monotonic (nondecreasing actually) the sequence of functions  $\{f_n\}_{n=1,2,\dots}$  is upper semiequicontinuous by (Feinberg et al., 2020, Theorem 3.1(ii)). Again, by upper semicontinuity,

$$f(\cdot) \equiv v(\cdot, zr(x, a) + y, z\beta) \geq \limsup_{n \rightarrow \infty} v(\cdot, z_n r(x_n, a_n) + y_n, z_n \beta) = \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n(\cdot)$$

implying that  $\{f_n\}_{n=1,2,\dots}$  upper semiconverges to  $f$  by (Feinberg et al., 2020, Remark 3.4). Also, it is easy to see that, since  $(d + b\mathbf{1}_C(\cdot))w(\cdot)$  is the common majorant of  $\{f_n\}_{n=1,2,\dots}$  by Definition (3.4) above, ((Feinberg et al., 2020), Condition (ii) of Theorem 2.2) holds. Hence, by ((Feinberg et al., 2020), Theorem 4.1),

$$\int_{\mathcal{X}} f(x')q(dx'|x, a) \geq \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\mathcal{X}} f_n(x')q(dx'|x_n, a_n)$$

which is equivalent to

$$\eta_r[v](x, y, z, a) \geq \limsup_{n \rightarrow \infty} \eta_r[v](x_n, y_n, z_n, a_n).$$

Thus, the function  $\eta_r[v]$  is u.s.c and, by ((Aliprantis and Border, 2006), Theorem 2.43), the supremum in (3.6) can be replaced by a maximum and this set of maximizers is nonempty compact since  $A(x)$  is compact given  $x \in \mathcal{X}$  by Assumption A(3) above. Thus, by (3.6) and Berge's theorem (Aliprantis and Border, 2006; Lemma 17.30), it follows that  $\bar{T}[v]$  is u.s.c. Moreover, by Monotone Convergence Theorem,  $(y, z) \rightarrow \eta_r[v](x, y, z, a)$  is non-decreasing and continuous (in particular l.s.c). Since the supremum of an arbitrary number of l.s.c functions is also l.s.c, it follows that  $(y, z) \rightarrow \bar{T}[v](x, y, z)$  is continuous and non-decreasing. The inequality  $\bar{T}[v](x, y, z) \geq U(y)$  follows directly. By (3.4) since  $v(\cdot) \leq (d + b\mathbf{1}_C(\cdot))w(\cdot)$ , we have  $\bar{T}[v](x, y, z) \stackrel{\text{by (3.7)}}{=} \max_{a \in \mathcal{A}(x)} \int_{\mathcal{X}} v(x', zr(x, a) + y, z\beta)q(dx'|x, a)$

$$\begin{aligned} & \max_{a \in \mathcal{A}(x)} \int_{\mathcal{X}} v(x', zr(x, a) + y, z\beta)q(dx'|x, a) \\ & \stackrel{a^* \in \mathcal{A}^*(x, y, z)}{\leq} \int_{\mathcal{X}} v(x', zr(x, a^*) + y, z\beta)q(dx'|x, a^*) \leq \int_{\mathcal{X}} (d + b\mathbf{1}_C(x'))w(x')q(dx'|x, a^*) \\ & \stackrel{\text{by Assumption A(1)}}{\leq} d \int_{\mathcal{X}} w(x')q(dx'|x, a^*) + b \int_{\mathcal{X}} \mathbf{1}_C(x')w(x')q(dx'|x, a^*) \\ & \stackrel{\text{by Assumption A(1)}}{\leq} d(\rho w(x) + b\mathbf{1}_C(x)) + bc' \int_{\mathcal{C}} q(dx'|x, a^*) \leq d(\rho w(x) + b\mathbf{1}_C(x)) + bc' \\ & \leq (d + b\mathbf{1}_C(x))w(x) + db\mathbf{1}_C(x) + bc' - (1 - \rho)dw(x) - b\mathbf{1}_C(x)w(x) \\ & = (d + b\mathbf{1}_C(x))w(x) + \begin{cases} db + bc' - (1 - \rho)dw(x) - bw(x) & x \in \mathcal{C}, \\ bc' - (1 - \rho)dw(x) & x \notin \mathcal{C}, \end{cases} \\ & \stackrel{\text{by Assumption A(1)}}{\leq} (d + b\mathbf{1}_C(x))w(x) + \begin{cases} b(c' + d) - ((1 - \rho)d + b) \left( \frac{c' + d}{(1 - \rho)\frac{d}{b} + 1} \right) & x \in \mathcal{C}, \\ (1 - \rho)(c'^2 - d\ell) & x \notin \mathcal{C}, \end{cases} \\ & \stackrel{\text{by Assumption A(1)}}{\leq} (d + b\mathbf{1}_C(x))w(x). \end{aligned} \tag{3.11}$$

Thus  $\bar{\mathbf{T}}[v] \in U$  The existence of a maximizing selector follows from the Generalized Selection Theorem of Dubins and Savage (Hinderer, 1970, Theorem 17.9).

We now prove the main Theorem of this section which nontrivially extends Theorem 2 of (Bauerle and Rieder, 2014) to unbounded per-stage cost or reward satisfying the w-growth condition (see Assumption A) above.

Theorem 3.2. Under Assumption (A), the following results hold:

1. For a policy  $\phi \equiv \{\phi_0, \phi_1, \dots\} \in \Pi^M$  it holds that  $v_{t\pi} = \mathbf{T}_{\phi_0 \circ \dots \circ \phi_{t-1}}^f[U]$ ,  $t = 1, \dots, T$  where  $v_{t\pi} = \underline{v}_{t\pi}$  when  $f = c$  and  $v_{t\pi} = \bar{v}_{t\pi}$  when  $f = r$ .
2. For  $(x, y, z) \in \hat{\mathcal{X}}$ ,  $\underline{v}_0(x, y, z) = \bar{v}_0(x, y, z) \equiv v_0(x, y, z) \equiv U(y)$  we have  $\underline{v}_t = \underline{\mathbf{T}}[\underline{v}_{t-1}]$  i.e.,

$$\underline{v}_t(x, y, z) = \inf_{a \in \mathcal{A}(x)} \int_{\mathcal{X}} \underline{v}_{t-1}(x', zc(x, a) + y, z\beta)q(dx'|x, a), \quad t = 1, \dots, T, \quad (3.12)$$

with  $\underline{v}_t \in \mathcal{L}(\hat{\mathcal{X}})$  for all  $t$ . In particular,  $\underline{v}_t = \underline{\mathbf{T}}^t[U]$  for all  $t$ . Similarly, we have  $\bar{v}_t = \bar{\mathbf{T}}[\bar{v}_{t-1}]$  i.e.,

$$\bar{v}_t(x, y, z) = \sup_{a \in \mathcal{A}(x)} \int_{\mathcal{X}} \bar{v}_{t-1}(x', zr(x, a) + y, z\beta)q(dx'|x, a), \quad t = 1, \dots, T, \quad (3.13)$$

with  $\bar{v}_t \in \mathcal{U}(\hat{\mathcal{X}})$  for all  $t$ . In particular,  $\bar{v}_t = \bar{\mathbf{T}}^t[U]$  for all  $t$ .

3. For each  $t = 1, 2, \dots, T$  there exists a minimizer  $\phi_t^* \in \Phi$  of  $\underline{v}_{t-1}$  (resp. maximizer  $\phi_t^* \in \Phi$  of  $\bar{v}_{t-1}$ ) and  $\pi^* \equiv (\pi_0^*, \dots, \pi_{T-1}^*) \in \Pi^M$  with,

$$\pi_0^*(x_0) \equiv \phi_T^*(x_0, 0, 1), \quad \pi_t^*(h_t) \equiv \phi_{T-t}^* \left( x_t, \sum_{s=0}^{t-1} \beta^s f(x_s, a_s), \beta^t \right) \quad (3.14)$$

is an optimal policy for (3.1) with  $f = c$  (resp.  $f = r$ ) in (3.14) above.

4.  $\underline{V}_{T,\beta}(x)$  (resp.  $\bar{V}_{T,\beta}(x)$ ) is the optimal l.s.c cost (resp. u.s.c utility) for (2.6) under the optimal policy (3.14) above for any  $x \in \mathcal{X}$ .

**Proof:** The proofs are provided below.

1. The proof of this part is similar to the proof of Theorem 2(a) of (Bauerle and Rieder, 2014) and hence is omitted.
2. We prove parts (2) and (3) together. Due to part (1) it follows that for  $\pi \in \Pi^M$ , the value function in problem (3.1) is the same as the value functions of the original MDP. Moreover, by Theorems 18.1 and 18.4 of (Hinderer, 1970), it suffices to consider Markov policies  $\Pi^M$  i.e.  $\underline{v}_t = \inf_{\pi \in \Pi} \underline{v}_{t\pi} = \inf_{\pi \in \Pi^M} \underline{v}_{t\pi}$  or  $\bar{v}_t = \sup_{\pi \in \Pi} \bar{v}_{t\pi} = \sup_{\pi \in \Pi^M} \bar{v}_{t\pi}$ . Now, since by Theorem 3.1(2) (resp. Theorem 3.1(1)) above  $\underline{\mathbf{T}}[v] \in \mathcal{L}(\hat{\mathcal{X}})$  (resp.  $\bar{\mathbf{T}}[v] \in \mathcal{U}(\hat{\mathcal{X}})$ ) whenever  $v$  is and there exists a minimizing (resp. maximizing) selector for  $v$  by Theorem 3.1(2) (resp. Theorem 3.1(1)), parts (2) and (3) follow from Theorem 14.4 of (Hinderer, 1970).
3. This part easily follows from the above parts and the fact that  $\underline{V}_{T,\beta}(x) = U^{-1} \circ \underline{v}_{T,\beta}(x) = U^{-1} \circ \underline{v}_T(x, 0, 1)$  (resp.  $\bar{V}_{T,\beta}(x) = U^{-1} \circ \bar{v}_{T,\beta}(x) = U^{-1} \circ \bar{v}_T(x, 0, 1)$ ) since  $U^{-1}$  is continuous and increasing.



Now the following corollary to Theorem 3.2 follows obviously by defining  $\hat{\mathcal{X}} \equiv \mathcal{X} \times \mathbb{R}_+$ , selectors  $\Phi \ni \phi: (x, y) \in \hat{\mathcal{X}} \rightarrow \phi(x, y) \in \mathcal{A}(x)$ , corresponding Definition (3.2) putting  $z = 1$ , Definitions (3.4), (3.5) and (3.6) with the corresponding transition kernel  $\tilde{q}(d(x', y')|x, y, a) \equiv q(d(x'|x, a) \otimes \mathbf{1}_{(f(x, a)+y)}(dy'))$  defined as,

$$\begin{aligned} \int_{\hat{\mathcal{X}}} v(x', y') \tilde{q}(d(x', y')|x, y, a) &= \int_{\hat{\mathcal{X}}} v(x', y') q(d(x'|x, a) \otimes \mathbf{1}_{(f(x, a)+y)}(dy')) \\ &= \int_{\mathcal{X}} v(x', f(x, a) + y) q(d(x'|x, a), f = c, r) \end{aligned} \quad (3.15)$$

and the corresponding (simpler) interpretation (putting  $z = 1$ ) of Theorem 3.1. The Corollary 3.3 is a nontrivial extension of Theorem 1 of (Bäuerle and Rieder, 2014).

Corollary 3.3. For the undiscounted case, i.e.  $\beta = 1$ , exactly same results as in Theorem 3.2 hold for  $V_T \stackrel{def}{=} \inf_{\pi \in \Pi} V_T^\pi$  and  $\bar{V}_T \stackrel{def}{=} \sup_{\pi \in \Pi} V_T^\pi$ .

We end this section with an important Remark.

**Remark 4.** It is to be noted here that, under these assumptions of upper semicontinuity of the map  $\mathcal{X} \ni x \rightarrow \mathcal{A}(x)$  in addition to the compactness of  $\mathcal{A}(x)$  for each  $x \in \mathcal{X}$ , (Bäuerle and Rieder, 2014) has proved the analogue of the above Theorem 3.2 (see Theorem 2 and Remark 2 therein) and Corollary 3.3 (see Theorem 1 therein) for bounded costs/rewards. We refer also to our Remark 2 above. Our Theorem 3.2 and Corollary 3.3 above automatically generalizes these corresponding results of (Bäuerle and Rieder, 2014) to any unbounded above cost or rewards satisfying standard  $w$ -growth conditions of Assumption (A) above.

#### 4. AN APPLICATION

In this section, we provide a real-life example from Portfolio Consumption using the robust risk-sensitive preferences of (Basu et al., 2022) originally from (Howard and Matheson, 1972). For a given fixed but arbitrary risk sensitivity parameter  $\theta > 0$ , let  $U(y) \equiv -\frac{1}{\theta} e^{-\theta y}$  be the concave reward/utility functional. We consider a portfolio of one asset with values  $x \in \mathcal{X} \equiv (0, \infty)$ . The state space is defined as  $\hat{\mathcal{X}} \equiv (0, \theta] \times \mathcal{X}$ . The action of a consumer (agent) is to consume an amount  $a \in \mathcal{A}(x) \equiv [0, \delta x] \subset \mathcal{A} \equiv \mathcal{X}$  when the value of the asset is  $x$  given a fixed but arbitrary  $0 \leq \delta \leq 1$ . Thus Assumption A (3) is satisfied. For some given fixed but arbitrary  $\gamma > 0$ , let  $\epsilon \stackrel{def}{=} \left(1 + \frac{2\sqrt{\pi\gamma}}{2-\sqrt{\pi}}\right)^2$  and  $C \stackrel{def}{=} (0, \theta] \times (0, \epsilon] \subset \hat{\mathcal{X}}$ . We choose a fixed but arbitrary  $\underline{\ell} \in (0, \frac{1}{2}]$  in Assumption A(1). We define the corresponding  $w(\cdot, \cdot)$  as,

$$w(\eta, x) \equiv \sqrt{x} + 1 - \underline{\ell}, \quad (\eta, x) \in \hat{\mathcal{X}}. \quad (4.1)$$

We choose, as per Assumption A(4), some u.s.c reward  $0 < r(\eta, x, a) \equiv r(x, a) \leq dw(\eta, x)$  at state  $(\eta, x)$  for action  $a$  where  $d \geq \frac{c'^2}{\underline{\ell}}$ . Given  $(\eta, x, a) \in Gr(\mathcal{A}) \equiv \{(\eta, x, a) : \eta \in (0, \theta], x \in \mathcal{X}; a \in [0, \delta x]\}$  we define the transition kernel  $\hat{q}(d(\eta', x')|\eta, x, a) \equiv q(d(x'|x, a) \otimes \mathbf{1}_{\eta\beta}(d\eta'))$  as follows,

$$\int_{\hat{\mathcal{X}}} v(\eta', x') \hat{q}(d(\eta', x')|\eta, x, a) = \int_{\hat{\mathcal{X}}} v(\eta', x') q(d(x'|x, a) \otimes \mathbf{1}_{\eta\beta}(d\eta'))$$

$$= \int_{\mathcal{X}} v(\eta\beta, x')q(dx'|x, a) \tag{4.2}$$

where

$$q(B|x, a) \equiv \int_B \left[ \frac{2a}{x^2} e^{-\frac{2x'}{x}} + \left(1 - \frac{a}{x}\right) \frac{1}{x + \gamma} e^{-\frac{x'}{x+\gamma}} \right] dx', \forall B \in \mathcal{B}(\mathcal{X}) \tag{4.3}$$

which models the (controlled) evolution of the asset value under consumptions. Let,

$$\rho \equiv \frac{\sqrt{\pi}}{4} + \frac{1}{2} \text{ and } b \equiv \frac{\sqrt{\pi\gamma}}{2} + \left(1 - \frac{\sqrt{\pi}}{2}\right) (1 - \underline{\ell}).$$

Now we state and prove the following important Lemma.

Lemma 4.1. The function  $w(\cdot, \cdot)$  as defined in (4.1) satisfies the conditions of Assumption A (1) above.

**Proof:**  $\omega(\cdot, \cdot) \geq \underline{\ell}$  and  $\underline{\ell} < c' = 2 \left(1 + \frac{\sqrt{\pi\gamma}}{2-\sqrt{\pi}}\right) - \underline{\ell}$  as required by Assumption A(1). Also, we see that,

$$\begin{aligned} c'(1-\rho) &= \left(1 - \frac{\sqrt{\pi}}{2}\right) \left(1 + \frac{\sqrt{\pi\gamma}}{2-\sqrt{\pi}}\right) - \underline{\ell} \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{\pi}}{4}\right) = \frac{2 - \sqrt{\pi} + \sqrt{\pi\gamma}}{2} - \underline{\ell} \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{\pi}}{4}\right) \\ &= 1 - \frac{\sqrt{\pi}}{2} + \frac{\sqrt{\pi\gamma}}{2} - \underline{\ell} \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{\pi}}{4}\right) > 1 - \frac{\sqrt{\pi}}{2} + \frac{\sqrt{\pi\gamma}}{2} - \underline{\ell} \left(1 - \frac{\sqrt{\pi}}{2}\right) = b \end{aligned} \tag{4.4}$$

as required by Assumption A (1). Now, using standard integration results, it can be checked that,

$$\begin{aligned} \int_{\hat{\mathcal{X}}} w(\eta', x') \hat{q}(d(\eta', x')|\eta, x, a) &= \int_{\hat{\mathcal{X}}} w(\eta', x') q(dx'|x, a) \otimes \mathbf{1}_{\eta\beta}(d\eta') \\ &= \int_{\mathcal{X}} w(\eta\beta, x') q(dx'|x, a) \\ &= \frac{a}{x} \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{2}} \sqrt{x} + \left(1 - \frac{a}{x}\right) \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{x + \gamma} + 1 - \underline{\ell} \\ &\leq \frac{a}{x} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{x} + \left(1 - \frac{a}{x}\right) \frac{\sqrt{\pi}}{2} (\sqrt{x} + \sqrt{\gamma}) + 1 - \underline{\ell} \\ &\leq \frac{\sqrt{\pi}}{2} (\sqrt{x} + \sqrt{\gamma}) + 1 - \underline{\ell} \\ &= \frac{\sqrt{\pi}}{2} w(x) + \frac{\sqrt{\pi\gamma}}{2} + \left(1 - \frac{\sqrt{\pi}}{2}\right) (1 - \underline{\ell}) \end{aligned} \tag{4.5}$$

for all  $(\eta, x, a) \in Gr(\mathcal{A})$ . It immediately follows from (4.5) above that,

$$\int_{\hat{\mathcal{X}}} w(\eta', x') \hat{q}(d(\eta', x')|\eta, x, a) \leq \rho w(\eta, x) + b, (\eta, x) \in \mathcal{C}, a \in \mathcal{A}(x). \tag{4.6}$$

Also, from (4.4) and (4.5) it follows that,

$$\int_{\hat{\mathcal{X}}} w(\eta', x') \hat{q}(d(\eta', x')|\eta, x, a) \leq \rho w(\eta, x), (\eta, x) \in \hat{\mathcal{X}} \setminus \mathcal{C}, a \in \mathcal{A}(x). \tag{4.7}$$

Combining the above inequalities (4.6) and (4.7) we get,

$$\int_{\hat{\mathcal{X}}} w(\eta', x') \hat{q}(d(\eta', x') | \eta, x, a) \leq \rho w(\eta, x) + b \mathbf{1}_C(\eta, x), \quad (\eta, x, a) \in Gr(\mathcal{A}) \quad (4.8)$$

as required by Assumption A (1).

We now formulate the risk-sensitive or robust preference problem along the lines of (Basu et al., 2022) and (Howard and Matheson, 1972). We denote by  $\mathcal{F}_+$  the set of extended non negative measurable functions  $f : \hat{\mathcal{X}} \rightarrow \mathbb{R} + \cup \{+\infty\}$  Given  $\pi \in \Pi$  the corresponding finite-horizon (i.e. from 0 to  $T$ ) risk-sensitive discounted utility  $V_{T,\beta}^\pi(\theta, \cdot)$  starting at  $(\theta, x_0) \in \hat{\mathcal{X}}$  is given as:

$$V_{T,\beta}^\pi(\theta, x_0) \stackrel{def}{=} -\frac{1}{\theta} \ln E_{x_0}^\pi \left[ e^{-\theta(\sum_{t=0}^{T-1} \beta^t r(X_t, a_t) + \beta^T g(X_T))} \right], \text{ and } V_{0,\beta}^\pi(\cdot, x_T) = g(x_T) \quad (4.9)$$

under the dynamics generated by  $\pi$ , where  $0 < \beta < 1$  is a given discount factor as in Section 2 and  $g(\cdot) \in \mathcal{F}_+$  is a given terminal cost function. The corresponding optimization problem is given as:

$$\bar{V}_{T,\beta}(\theta, x_0) \equiv \sup_{\pi \in \Pi} V_{T,\beta}^\pi(\theta, x_0). \quad (4.10)$$

As we shall show below in Proposition 4.3, by Theorems 18.1 and 18.4 of (Hinderer, 1970), it suffices to consider Markov policies  $\pi \in \Pi^M$  i.e.

$$\bar{V}_{T,\beta}(\theta, x_0) \equiv \sup_{\pi \in \Pi} V_{T,\beta}^\pi(\theta, x_0) = \sup_{\pi \in \Pi^M} V_{T,\beta}^\pi(\theta, x_0). \quad (4.11)$$

We now provide below a heuristic recursive formulation for the preference function (4.9) which shall allow us to better understand the Dynamic Programming formulation for this maximization problem (4.11) above,

**Lemma 4.2.** For  $1 \leq t \leq T$ ,  $\eta \in (0, \theta]$  and any  $\pi \in \Pi$ ,

$$V_{t,\beta}^\pi(\eta, X_{T-t}) = r(X_{T-t}, a_{T-t}) - \frac{1}{\eta} \ln E_{X_{T-t}}^\pi \left[ e^{-\eta \beta V_{t-1,\beta}^\pi(\eta \beta, X_{T-t+1})} \right]$$

$$\text{with the terminal condition } V_{0,\beta}^\pi(\cdot, X_T) = g(X_T). \quad (4.12)$$

**Proof:** Note that, using (4.9), we can get,

$$\begin{aligned} V_{t,\beta}^\pi(\eta, X_{T-t}) &= -\frac{1}{\eta} \ln E_{X_{T-t}}^\pi \left[ e^{-\eta(\sum_{s=T-t}^{T-1} \beta^{s-(T-t)} r(X_s, a_s) + \beta^t g(X_T))} \right] \\ &= -\frac{1}{\eta} \ln E_{X_{T-t}}^\pi \left[ e^{-\eta r(X_{T-t}, a_{T-t}) - \eta \beta \sum_{s=T-t+1}^{T-1} \beta^{s-(T-t+1)} r(X_s, a_s) - \eta \beta^t g(X_T)} \right] \\ &= -\frac{1}{\eta} \ln E_{X_{T-t}}^\pi \left[ e^{-\eta r(X_{T-t}, a_{T-t})} E_{X_{T-t+1}}^\pi \left[ e^{-\eta \beta (\sum_{s=T-t+1}^{T-1} \beta^{s-(T-t+1)} r(X_s, a_s) + \beta^{t-1} g(X_T))} \right] \right] \\ &= -\frac{1}{\eta} \ln E_{X_{T-t}}^\pi \left[ e^{-\eta r(X_{T-t}, a_{T-t})} e^{-\eta \beta V_{t-1,\beta}^\pi(\eta \beta, X_{T-t+1})} \right] \\ &= r(X_{T-t}, a_{T-t}) - \frac{1}{\eta} \ln E_{X_{T-t}}^\pi \left[ e^{-\eta \beta V_{t-1,\beta}^\pi(\eta \beta, X_{T-t+1})} \right]. \end{aligned} \quad (4.13)$$

The terminal condition is obvious.

$\mathcal{L}_{RAS}$  shown by Lemma 4.2 above, there is an explicit time-dependence of the risk aversion parameter through exponentiation of the discounting factor  $\beta$ . Hence we have defined our Markov control process  $\{(\eta_t; X_t)\}_{0 \leq t \leq T}$  on the enhanced state space  $\hat{\mathcal{X}}$ , with the selectors now being measurable maps  $\phi : \hat{\mathcal{X}} \rightarrow \mathcal{A}$  such that  $\hat{\mathcal{X}} \ni (\eta, x) \rightarrow \phi(\eta, x) \in \mathcal{A}(x)$  (see notations above). We again denote by  $\Phi$  the set of such selectors. The definitions for histories and all types of policies can be defined analogously as above and we keep the notations similar to Section 2 above for ease of understanding. The corresponding transition kernel  $\hat{q}(\cdot|\cdot)$  has been defined in (4.2) above. Again, the Ionescu-Tulcea theorem (see, e.g., (Bertsekas and Shreve, 1996, Proposition 7.28) implies that, for each initial state  $(\eta, x) \in \hat{\mathcal{X}}$  and policy  $\pi \in \Pi$ , there exists a unique probability measure  $P_{\eta,x}^\pi$  and a stochastic process  $\{((\eta_t, X_t); A_t)\}_{0 \leq t \leq T}$  on the space  $(H_T, \mathcal{B}(H_T))$  of all histories (trajectories) such that  $(\eta_t, X_t)(h_T) = (\eta_t, x_t)$  is the (random) state and  $A_t(h_T) = a_t$  is the (random) action at time  $t$  for  $h_T \in H_T$ . We denote by  $E_{\eta,x}^\pi$  the corresponding expectation. Now, we can simply consider the preference function (4.9) to be defined on the above state space  $\hat{\mathcal{X}}$  with the corresponding optimization problem (4.10) or (4.11) as being defined on the associated state process  $\{(\eta_t, X_t)\}_{0 \leq t \leq T}$  as explained above. Having understood this, we now proceed to define the corresponding Bellman operators. Motivated by Lemma 4.2, the kernel (4.2) and the discussions around it, we define  $\exists (\eta, x, a, f) \rightarrow \mathcal{L}_R$ :  $(\eta, x, a) \mathcal{L}_R : \hat{\mathcal{X}} \times \mathcal{A} \times \mathcal{F}_+ \text{WS}$ :

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_R(\eta, x, a, f) &\equiv r(x, a) - \frac{1}{\eta} \ln \int_{\hat{\mathcal{X}}} e^{-\eta' f(\eta', x')} \hat{q}(d(\eta', x')|\eta, x, a) \\ &= r(x, a) - \frac{1}{\eta} \ln \int_{\mathcal{X}} e^{-\eta \beta f(\eta \beta, x')} q(dx'|x, a). \end{aligned} \tag{4.14}$$

For  $\phi \in \Phi$  and  $(\eta, x, f) \in \hat{\mathcal{X}} \times \mathcal{F}_+$ , let,

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_\phi^{(R)} f(\eta, x) &\stackrel{def}{=} \mathcal{L}_R(\eta, x, \phi(\eta, x), f), \\ \mathbf{T}^{(R)} f(\eta, x) &\stackrel{def}{=} \sup_{a \in \mathcal{A}(x)} \mathcal{L}_R(\eta, x, a, f). \end{aligned} \tag{4.15}$$

We now state the following main result (Bellman Dynamic Programming Recursion) of this Section for the cost function (4.9) as follows directly from Theorem 3.2 above. Hence we have proved the following Proposition.

**Proposition 4.3.** For the Portfolio Consumption Model above, it holds that

1. For any given policy  $(\phi_0, \dots, \phi_{T-1}) \equiv \pi \in \Pi^M$  with  $\phi_t \in \Phi$ ,  $\bar{V}_{T,\beta}^\pi = T_{\phi_0}^{(R)} \circ \dots \circ T_{\phi_{T-1}}^{(R)} g$ .

2.  $\bar{V}_{0,\beta} \equiv g$  and  $\bar{V}_{t,\beta} = \mathbf{T}^{(R)} \bar{V}_{t-1,\beta}$  i.e. for  $t = 1, \dots, T$

$$\begin{aligned} \bar{V}_{t,\beta}(\eta, x) &= \sup_{a \in \mathcal{A}(x)} \mathcal{L}_R(\eta, x, a, \bar{V}_{t-1,\beta}) \\ &= \sup_{a \in \mathcal{A}(x)} \left[ r(x, a) - \frac{1}{\eta} \ln \int_{\mathcal{X}} e^{-\eta \beta \bar{V}_{t-1,\beta}(\eta \beta, x')} q(dx'|x, a) \right], \quad (\eta, x) \in \hat{\mathcal{X}}. \end{aligned} \tag{4.16}$$

So,  $\bar{V}_{t,\beta} = (\mathbf{T}^{(R)})^t g$  for all  $t$  and in particular  $\bar{V}_{T,\beta} = (\mathbf{T}^{(R)})^T g$ .

3. There exists a maximizing sequence  $\{\phi_t^* \in \Phi\}_{0 \leq t \leq T-1}$  and  $\pi^* \equiv (\pi_0^*, \dots, \pi_{T-1}^*) \in \Pi^M$  such that, for all  $t = 0, \dots, T-1$ .

$$\pi_t^*(h_t) \equiv \phi_t^*(\eta_t, x_t) = \arg \max_{a \in \mathcal{A}(x_t)} \mathcal{L}_R(\eta_t, x_t, a, \bar{V}_{T-1-t,\beta})$$

$$= \arg \max_{a \in \mathcal{A}(x_t)} \left[ r(x, a) - \frac{1}{\eta_t} \ln \int_{\mathcal{X}} e^{-\eta_t \beta \bar{V}_{T-1-t, \beta}(\eta_t \beta, x')} q(dx' | x_t, a) \right] \quad (4.17)$$

is an optimal policy for (4.9). In fact  $\phi_t^*(\eta_t, x_t) \equiv \phi^*(\eta_0 \beta^t, x_t)$  for some fixed  $\phi^* \in \Phi$  where, as in (4.9),  $\eta_0 = \theta$  is the given risk-sensitivity parameter.

## 5. CONCLUSION AND FUTURE DIRECTIONS

Our main technical contribution is to solve a certainty equivalent optimization problem in the finite horizon case for per-stage unbounded costs and rewards satisfying a  $w$ -growth condition (see Theorem 3.2 and Corollary 3.3 in Section 3). In the process, a result of much broader potential applicability have been proved, namely, certain important closure properties of the dynamic programming (Bellman) operators, the compactness of optimal action (sub)sets and the corresponding existence of optimizing selectors in Theorem 3.1 in Section 3. We also provide a real-life example from Portfolio Consumption Model to illustrate our ideas (see Proposition 4.3 in Section 4) because such models have regularly been used as canonical examples in certainty equivalent formulations. Several more nontrivial applications and examples can be created as separate papers from these theoretical foundations along the lines of the references mentioned in the Introduction. This work can further be extended to noncompact action spaces as well as to generic unbounded-above per-stage costs/rewards without assuming any growth conditions. A further direction of technical interest would be to address these issues for the infinite horizon cost or reward setup as well as the corresponding average cost or reward setups given appropriate geometric ergodicity conditions on the underlying controlled state process. Another direction would be to study the preferences of general Epstein-Zin-Weil structure-types in this framework as a decision problem of significant interest. An interesting research direction would be to study computational algorithms to evaluate such value functions as studied herein for large-scale optimization problems.

## 6. ACKNOWLEDGMENT

The author most sincerely thanks Prof. Dr. Sukru Talas for his kind support in typesetting and formatting this manuscript as per the requirements of this journal.

## 7. CONFLICT OF INTEREST

Authors approve that to the best of their knowledge, there is not any conflict of interest or common interest with an institution/organization or a person that may affect the review process of the paper.

## 8. AUTHOR CONTRIBUTION

Arnab BASU has the full responsibility of the paper about determining the concept of the research, data collection, data analysis and interpretation of the results, preparation of the manuscript and critical analysis of the intellectual content with the final approval.

## 9. REFERENCES

Aliprantis C. D., Border K. C., Infinite Dimensional Analysis: A Hitchhiker's Guide, Third Ed., Springer-Verlag, Berlin, 2006.

- Altman E., Hordijk A., Spieksma F. M., Contraction Conditions for Average and  $\alpha$ -discount Optimality in Countable State Markov Games with Unbounded Rewards, *Math. Oper. Res.* 22(3), 588-618, 1997.
- Anderson E. W., Hansen L. P., Sargent T. J., Small Noise Methods for Risk Sensitive/Robust Economies, *J. Econ. Dyn. Control* 36, 468-500, 2012.
- Basu A., Lontzek T., Schmedders, K., Zhao Y., The Social Cost of Carbon when we wish for Robustness, Accepted for publication in *Management Science*, 2022.
- Bäuerle N., Rieder U., More Risk-Sensitive Markov Decision Processes, *Math. Oper. Res.* 39(1), 105-120, 2014.
- Bäuerle N., Jasckiewicz A., Stochastic Optimal Growth Model with Risk-Sensitive Preferences. *J. Eco. Theory* 173, 181-200, 2018.
- Bellman R., *Dynamic Programming*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, U.S.A, 1957.
- Bertsekas D. P., Shreve, S. E., *Stochastic Optimal Control: The Discrete-Time Case*, Athena Scientific, Belmont, Massachusetts, 1996.
- Bielecki T., Pliska S. R., Economic Properties of the Risk-Sensitive Criterion for Portfolio Management, *Rev. Account. Fin.* 2(2), 3-17, 2003.
- Bommier A., Life-Cycle Preferences Revisited, *J. Eur. Econ. Assoc.* 11(6), 1290-1319, 2013.
- Bommier, Lanz A. B., Zuber S., Models-as-usual for Unusual Risks? On the Value of Catastrophic Climate Change, *J. Environ. Econ. Manag.* 74, 1-22, 2015.
- Bommier A., Kochov A., Le Grand F., On Monotone Recursive Preferences, *Econometrica* 85(5), 1433-1466, 2017.
- Bommier, A. and F. Le Grand., Risk Aversion and Precautionary Savings in Dynamic Settings, *Management Science* 65(3), 1386-1397, 2019.
- Borkar V. S., *Probability Theory: An Advance Course*, Springer-Verlag, New York, 1995.
- Cai Y., Lontzek T. S., The Social Cost of Carbon with Economic and Climate Risks, *J. Pol. Econ.* 127(6): 2684-2734, 2019.
- Di Masi G. V., Stettner L., Risk-sensitive Control of Discrete-time Markov Processes with Infinite Horizon, *SIAM J. Control Optim.*, 38(1): 61-78, 1999.
- Epstein L. G., Zin S. E., Substitution, Risk Aversion, and the Temporal Behaviour of Consumption and Asset Returns: A Theoretical Framework, *Econometrica* 57(4): 937-969, 1989.
- Epstein L. G., Zin S. E., Substitution, Risk Aversion, and the Temporal Behaviour of Consumption and Asset Returns: An Empirical Analysis, *J. Pol. Econ.* 99(2):263-286, 1991
- Feinberg E. A., Kasyanov P. O., Zadoianchuk N. V., Average Cost Markov Decision Processes with Weakly Continuous Transition Probabilities, *Math. Oper. Res.* 37(4), 591-607, 2012
- Feinberg E. A., Kasyanov P. O., Liang Y., Fatou's Lemma in Its Classical Form and Lebesgue's Convergence Theorems for Varying Measures with Applications to Markov Decision Processes, *Theory Probab. Appl.* 65(2), 270-291, 2020.
- Hansen L. P., Sargent T. J., Discounted Linear Exponential Quadratic Gaussian Control, *IEEE Trans. on Auto. Control* 40(5): 968-971, 1995.
- Hansen L. P., Sargent T. J., Turmuhambetova G., Williams N., Robust Control and Model Misspecification, *J. Econ. Theory* 128, 45-90, 2006.
- Hansen L. P., Sargent T. J., Recursive Robust Estimation and Control without Commitment, *J. Econ. Theory* 136(1): 1-27, 2007.
- Hansen L. P., Sargent T. J., *Robustness*. Princeton Univ. Press, 2008.

- Hinderer K., Foundations of Nonstationary Dynamic Programming with Discrete Time Parameter, Springer-Verlag, Berlin, 1970.
- Howard R. A., Matheson J. E., Risk-sensitive Markov Decision Processes, Management Sc. 18(7), 356-369, 1972.
- Jacobson D. H., Optimal Stochastic Linear Systems with Exponential Performance Criteria and Their Relation to Deterministic Differential Games, IEEE Trans. Aut. Control, AC-18(2): 124-131, 1973.
- Kreps D. M., Decision Problems with Expected Utility Criteria, I: Upper and Lower Convergent Utility, Math. Oper. Res. 2(1), 45-53, 1977.
- Kreps D. M., Decision Problems with Expected Utility Criteria, II: Stationarity Math. Oper. Res. 2(3), 266-274, 1977.
- Kreps D. M., Porteus E. L., Temporal Resolution of Uncertainty and Dynamic Choice Theory, Econometrica, 46(1): 185-200, 1978.
- Kreps D. M., Porteus E. L., Dynamic Choice Theory and Dynamic Programming, Econometrica, 47(1): 91-100, 1979.
- Meyn S. P., Tweedie R. L., Markov Chains and Stochastic Stability, Second Ed., Cambridge University Press, 2009.
- Muliere P., Parmigiani G., Utility and Means in the 1930s, Statistic. Sc. 8(4), 421-432, 1993.
- Nowak A. S., Notes on risk-sensitive Nash equilibria, in Advances in Dynamics, 95-109, Ann. Internatl. Soc. Dyn. Games, 7, Birkhauser, Boston, 2005.
- Nowak A. S., Altman E.,  $\varepsilon$ -Equilibria for Stochastic Games with Uncountable State Space and Unbounded Costs, SIAM J. Control Optim. 40(6), 1821-1839, 2002.
- Tallarini Jr. T. D., Risk-Sensitive Business Cycles, J. Mon. Econ. 45, 507-532, 2000.
- Whittle P., Risk-Sensitive Optimal Control, Wiley, Chichester, England, and New York, 1990.

Araştırma Makalesi / Research Article

Examination of Deformation in Thin-Walled Structures Processed by Micro-Milling Method

Ahmet HASÇELİK<sup>1\*</sup>, Kubilay ASLANTAŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, İncehisar Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,  
Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-4615-0640>, ahascelik@aku.edu.tr

<sup>2</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,  
Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0003-4558-4516>, kaslantas@aku.edu.tr

Geliş/ Received: 06.11.2022;

Kabul / Accepted: 12.03.2023

**ABSTRACT:** Micro-thin-walled structures are frequently encountered in micro-pumps, micro-channel cooler plates, and micro-molds in the defense, aerospace and biomedical sectors. One of the micro-machining methods frequently used to obtain micro-thin-walled structures is micro-milling. The micro-milling method makes machining possible for micro-components with high accuracy and a good surface finish. However, there are many issues to consider when micro-milling thin-walled geometries. The fact that the wall deformation is directly related to the rate of progression necessitates knowing what effects the rate of progression cause on the wall deformation. Because the micro milling technique is generally used as the final cutting process in the creation of thin wall geometries in the industry. In this study, thin-walled structures were obtained by micro-milling the Al6061-T6 material. The influence of feed rate on wall deformation was investigated by applying different feed rates in micro milling experiments. Wall deformation measurements were performed using a motorized optical profilometer device. It has been observed that increasing feed value causes an enhance in cutting forces, it also causes an increase in the deformation of the micro-thin wall. The deformation distance between the end points of the micro-milled wall geometry using a feed rate of 1  $\mu\text{m}/\text{tooth}$  is three times greater than the thin-wall geometry created using a feed rate of 0.2  $\mu\text{m}/\text{tooth}$ . It has been determined that the deformation is much higher in the entrance and exit areas of the micro-thin wall. The wall deformation also decreases from the upper point to the lower points of the micro-thin wall. While the deviation distance in the measurement taken from the upper point of the wall geometry obtained by using the 1  $\mu\text{m}/\text{tooth}$  feed rate, where the deformation is more, can reach 100  $\mu\text{m}$ , the deviation at the lower point of the wall is negligible.

**Keywords:** Thin Wall Structures, Micro Milling, Plastic Deformation, Cutting Parameters, Al6061-T6.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: ahascelik@aku.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

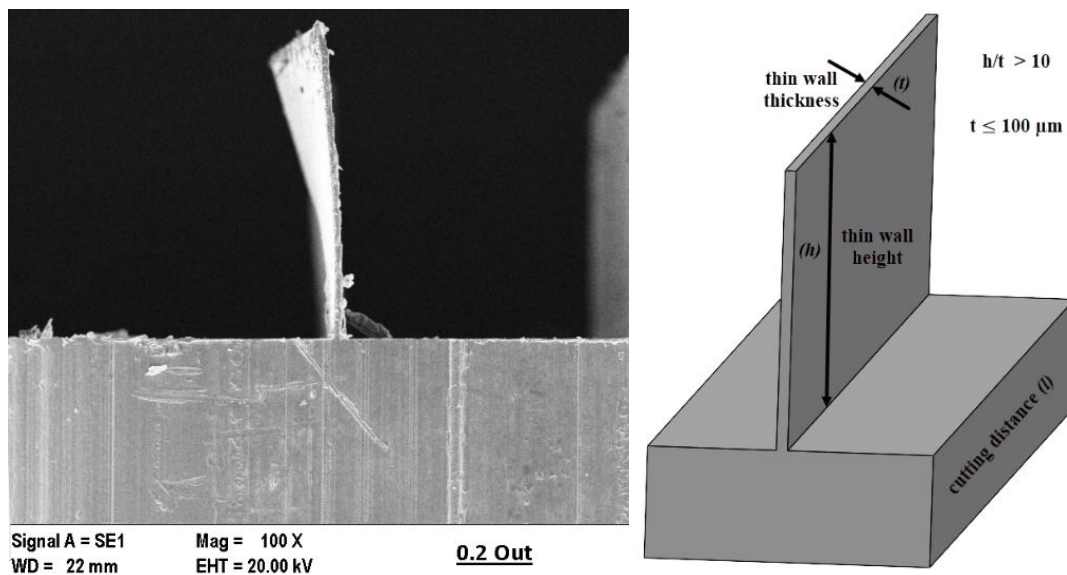
Hasçelik, A., Aslantaş, K. (2023). Examination of Deformation in Thin-Walled Structures Processed by Micro-Milling Method. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 134-146.



## 1. INTRODUCTION

The need for micro equipment is increasing day by day with the development of technology. Thin-walled structures are frequently encountered in micron-sized equipment and frequently used in aerospace, space technologies and biomedical applications. Examples of these structures are micro-channel cooler plates, micro propellers, micro molds, micro pumps, biodegradable implants (Yi et al., 2019). Due to the geometrical properties of these micro-scale equipment, they have to be produced very precisely. Micro milling is a widely used micro machining method for the creation of thin wall geometries (Dornfeld et al., 2006; Fabio et al., 2017). The biggest problems encountered in micro-milling of thin-walled structures are plastic deformation and dimensional errors in the wall geometry (Lazoğlu and Mamedov, 2016). The result is a poor surface quality with machining defects. For this reason, cutting parameters and cutting strategy must be carefully chosen in order to minimize wall deformation during micro-milling of thin-walled structures.

For a structure to be defined as a thin wall, the ratio of the wall height ( $h$ ) to the wall thickness ( $t$ ) must be greater than 10 (Khandagale et al., 2018). It is stated that the wall thickness should be 100  $\mu\text{m}$  or less in order to dimensionally separate the thin walls produced by the micro-milling method from the thin walls produced by the conventional milling method (Figure 1) (Yarin et al., 2009).



**Figure 1.** SEM image of a sample microthin wall and description of the structural dimensions of the wall

The most important factors to consider in micro machining is the size effect (Hasçelik and Aslantaş, 2021). The size effect is directly related to the minimum chip thickness. As the size gets smaller, different effects are observed depending on the minimum chip thickness (Aslantaş et al., 2020; Chae et al., 2006). In order to eliminate these effects, it is important to define the minimum chip thickness. For a healthy micro milling process, the cutting parameters should be selected depending on the minimum chip thickness (Aslantaş and Çiçek, 2018). Choosing the optimum cutting parameters is one of the main factors in order to minimize the part deformation (Erçetin et al., 2020; Aslantaş and Alatrushi, 2021). High cutting forces in micro milling, vibrations due to size effect and negative rake angle due to minimum chip thickness cause instabilities in the cutting process (Shimada et al., 1993; Yuan et al., 1996; Kim et al., 2002; Chae et al., 2006; Sun and Cheng, 2010). For this reason, in the micro milling process, the cutting process should be completed by taking into account the effects of all these issues.

Thin-walled microstructures used in industry are generally made of titanium and aluminum material blocks (Ciecielag and Zaleski, 2022). Aluminum alloys are frequently preferred in the industry due to their thermal and electrical conductivity, being suitable for heat treatments, being easily shaped, being light, having low yield stress and high fatigue resistance (Akram et al., 2018). Its low rigidity, on the other hand, is a major disadvantage, especially in the processing of thin-walled structures. Al6061 alloy stands out as the most versatile heat treatable alloy of aluminum. With the T6 heat treatment, the aluminum alloy reached its maximum precipitation hardening. For this reason, yield strength (>240 MPa) and tensile strength (>290 MPa) are quite high (Akram et al., 2018).

Deformation errors are a common problem in micro-milling of thin-walled structures (Gao et al., 2022). Researchers have done many studies to reduce wall deformation. Ramanaiah et al., (2017) drew attention to optimum cutting parameters to minimize deformation. They proved that the wall deformation is low at high cutting speed, low depth of cut and feed rate (Gao et al., 2022). With the milling direction and strategy, the wall deformation can be reduced to even lower values (Li et al., 2010). Cheng et al., (2018) correlated the tool edge radius with the minimum chip thickness in determining the feed rate in thin-walled structures formed by micro milling. As a result, they stated that the minimum chip thickness is not only a fixed ratio of the tool edge radius, but also the depth of cut should be taken into account. Li et al., (2018) modeled wall deformation in the micro milling process with the finite element method. Loehe et al., (2012) used optical measuring instruments to measure the mechanical deformation value of micro thin-walled workpieces. Gao et al., (2016) developed a strategy to reduce thin-wall deformation with optimum cutting parameters and reduced the wall deformation by 52%.

In this study, the deformation of thin-walled structures obtained by micro-milling method from Al6061-T6 alloy, which is frequently used in the aerospace, defense and biomedical sectors, was investigated. The effects of feed rate on cutting forces and wall deformation were observed. In addition, it is graphically shown how the wall deformation changes from the top of the thin wall to the bottom of the wall. Thin wall deformation measurements were taken using a different measurement technique than the studies in the literature. In addition, the effect on the wall deformation was determined by using two different feed rates lower and higher than the minimum chip thickness. The coming out results and possible causes are explained. Thus, the efforts to increase the quality of the parts aims to find a response in industrial applications.

## **2. MATERIALS AND METHODS**

### **2.1 Experimental Setup**

In the study, a special horizontally positioned experimental setup was used for micro milling experiments (Figure 2). The speed adjustment of the IMT brand spindle, which can go up to 60000 rpm, and the axis movements supported by micro stepper motors can be controlled with the help of a computer. Compressed air obtained from the compressor was used to fix the cutting tool to the spindle with the help of pliers. The cutting tool moves along the Z axis. Thus, the depth of cut is given by the Z axis. The sample holder, on which the workpiece is fixed, is located on the mini dynamometer (Kistler-9119AA1) fixed to the slides moving along the X axis. During the cutting process, the force data measured by the dynamometer is graphically printed on the computer screen with the help of the amplifier. During the cutting process, the feed is on the Y axis. A Usb microscope was utilized to observe the wall geometry during cutting.

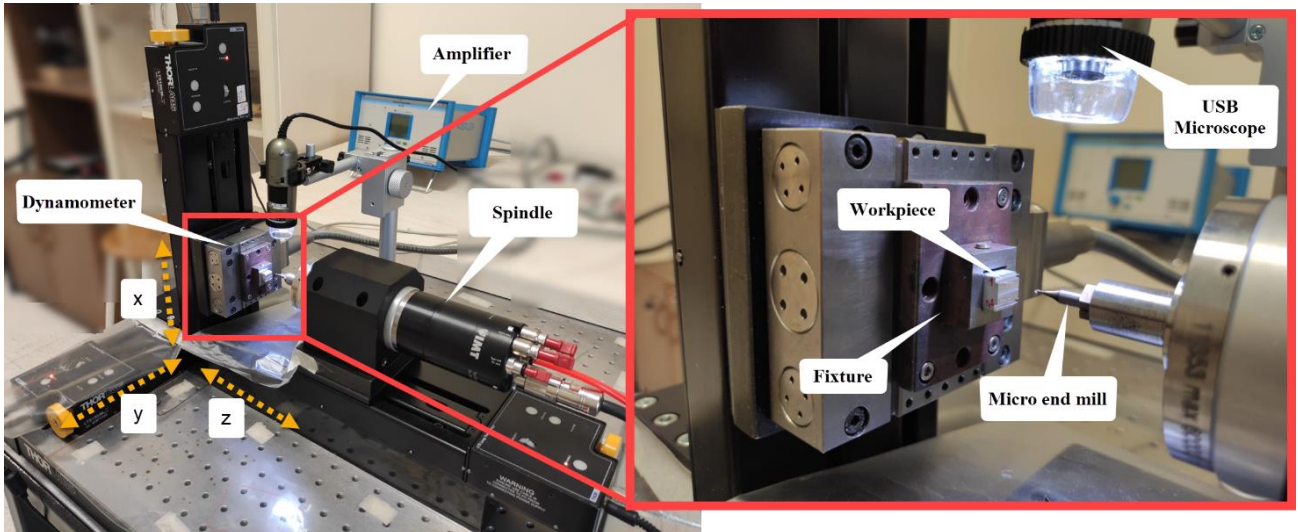


Figure 2. Experimental setup used in the study

### 2.2 Material and Cutting Tool

In the study, Al6061-T6 alloy, which has a widespread production volume in terms of its mechanical properties (Table 1), was used (Akram et al., 2018). Supplied with dimensions of 10 mm x 10 mm x 3000 mm, the Al6061-T6 workpiece was cut into small pieces using a precision sample cutting device. After fixing the 10 mm x 10 mm x 20 mm workpiece to the sample holder, it was subjected to micro milling to obtain a thin wall structure (Figure 3).

Table 1. Mechanical properties of Al6061-T6 material (Warsi et. al., 2017)

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Ultimate tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Thermal conductivity (W/m K)
Al 6061-T6	2.7	310	275	69	167

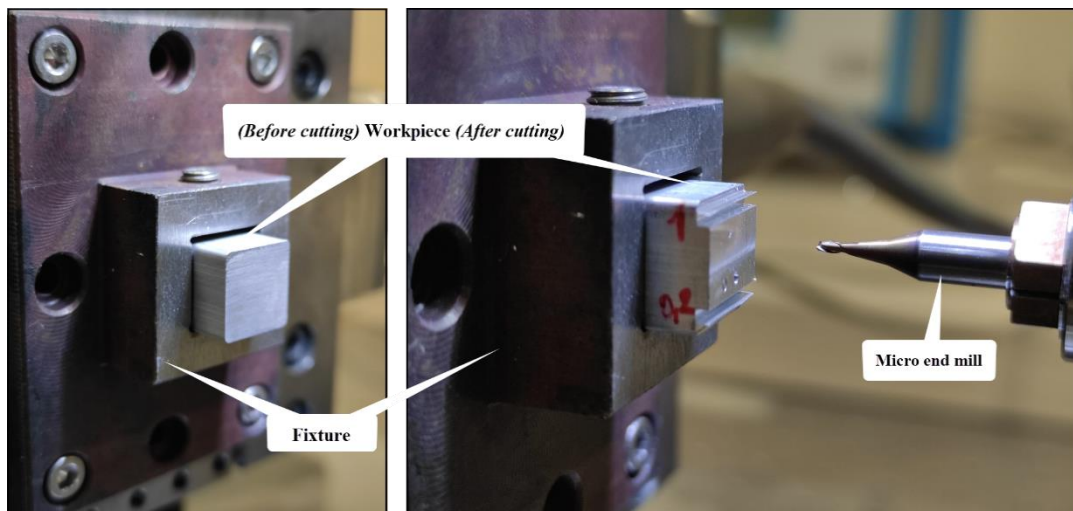
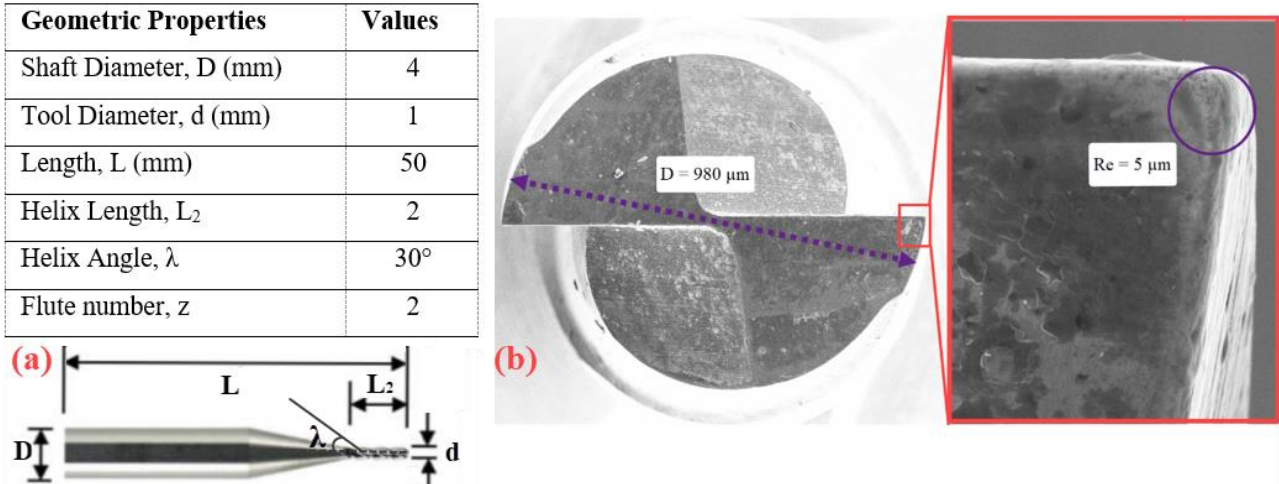


Figure 3. View of the workpiece before and after cutting

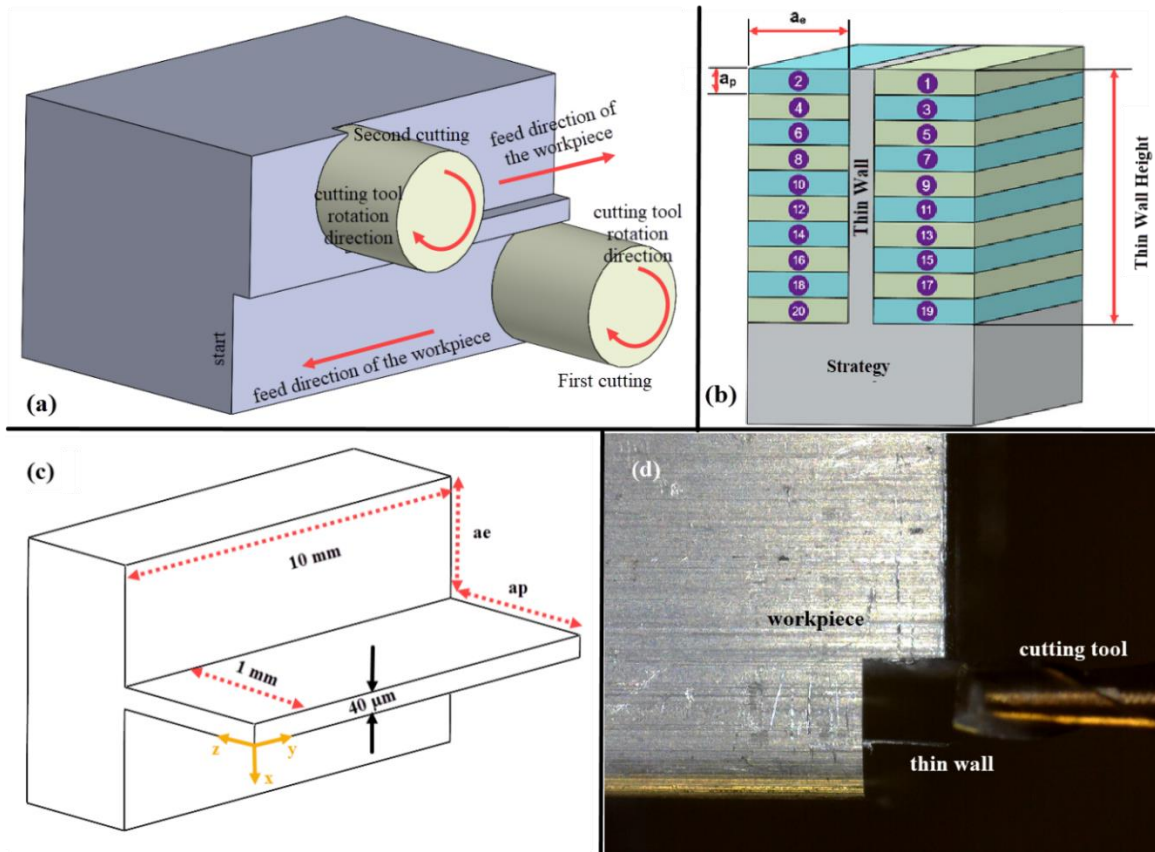
In the micro-milling of the thin wall structure, a Tungsten Carbide cutting tool with 1  $\mu\text{m}$  AlTiSiN coating was used in the geometric properties in Figure 4a. Although the tool diameter is specified as 1 mm according to the data of the company from which the cutting tool is supplied, Predicting that the diameter differences in micron size may affect the wall thickness, the cutting tool diameter was measured using an electron microscope (SEM) before starting the cutting experiments (Figure 4b). The diameter value of the cutting tool used in these experiments was 980  $\mu\text{m}$ , and the edge radius was 5  $\mu\text{m}$ .



**Figure 4.** Geometric parameters (a) and SEM photographs (b) of the cutting tool used in cutting experiments

### 2.3 Experimental Systematics

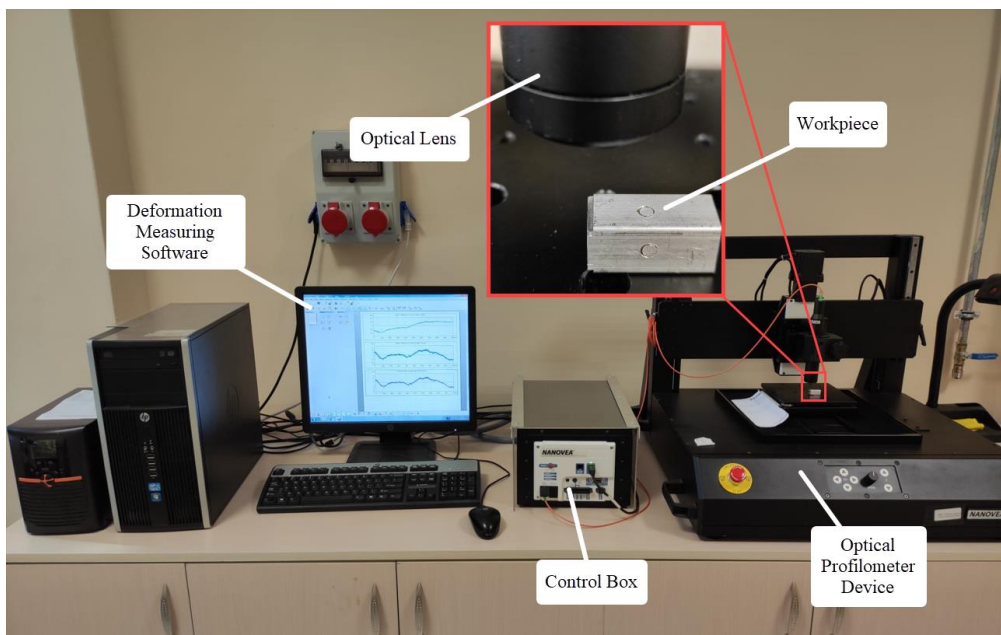
At first, constant cutting speed  $V_c = 94.1$  m/min, speed  $N=30000$  rpm and  $a_p=0.1$  mm depth of cut at 7 different feed rates (0.025, 0.5, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2  $\mu\text{m}/\text{tooth}$ ) micro milling experiments were carried out to confirm the effect of feed rate on cutting forces. Next, a thin wall structure was formed separately by micro milling for 0.2  $\mu\text{m}/\text{tooth}$  and 1  $\mu\text{m}/\text{tooth}$  feed rates. These feed rates were selected among the parameters recommended by the tool manufacturer. It is aimed to compare the effect of cutting forces and ploughing by selecting values below and above the minimum chip thickness. The milling technique used to create the thin wall is shown in Figure 5a. A wall height of 1 mm was obtained by performing a total of 20 unloading operations from both sides of the wall, respectively,  $a_p = 0.1$  mm (Figure 5b). After the first unloading process from left to right, the cutting tool was shifted by 1030  $\mu\text{m}$  considering 980  $\mu\text{m}$  tool diameter + 50  $\mu\text{m}$  wall thickness, and the unloading process was performed from right to left. This process was repeated 10 times, giving 0.1  $\mu\text{m}$  more cutting depth each time. The geometric dimensions of the thin wall structure at the end of the cutting process are shown in Figure 5c. At the end of the cutting process, the wall thickness was measured as 40  $\mu\text{m}$ . The 10  $\mu\text{m}$  difference is thought to be due to the run out of micro-milling process. In this case, the ratio of the wall height to the wall thickness ( $h/t$ ) is 25. In Figure 5d, a photograph of the thin wall structure taken with a Usb microscope at the end of the micro-cutting experiment is shown.



**Figure 5.** a) The milling technique used in the creation of the thin wall b) The strategy applied in the creation of the thin wall c) The geometric dimensions of the thin wall d) The photograph of the thin wall taken with a Usb microscope

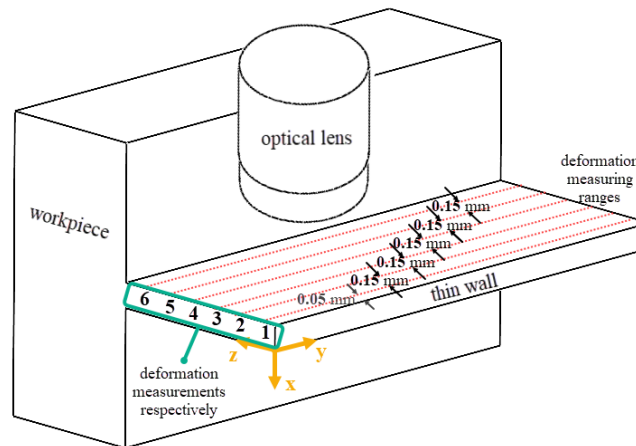
### 2.4 Measurement of Thin Wall Deformation

Deformations of thin-wall structures formed at two different feed rates by micro-milling method were measured using an optical profilometer (Figure 6). Measurements were taken from the wall surface and compared with the Nanovea brand device working with white light technology. The scanning distance was along the wall (10 mm), the scanning frequency was 1000 Hz, the step was 0.1 μm.



**Figure 6.** Optical profilometer device used in thin-wall deformation measurements

First, the laser beam in the optical lens is focused on the workpiece. Then, zeroing process was performed in the y and z coordinates from the top surface of the thin wall and to the exit point of the cutting part. The first scanning was performed along the lateral surface of the wall (10 mm) in the y-axis after the optical focus was shifted 0.05 mm from the 0 point of the wall in the +z direction. Subsequently, a total of 6 scans were made by moving 0.15 mm more in the +z direction before each scan (Figure 7). This measurement was repeated in the same way for thin-wall structures formed with 0.2  $\mu\text{m}/\text{tooth}$  and 1  $\mu\text{m}/\text{tooth}$  feed rates, separately.



**Figure 7.** Thin wall deformation measuring mechanism

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 Comparison of Cutting Forces

In order to observe thoroughly the effect of feed rate on cutting forces, micro-milling experiments were carried out at constant depth of cut and cutting speed. Seven different feed rates were used to determine exactly whether the cutting was performed by sliding or ploughing mechanism. The amount remaining between the maximum and minimum force values was taken into account in the cutting force data obtained graphically in the computer environment. This amplitude value, which is widely used in micro milling tests, is also called Peak to Valley (Aslantaş et al., 2022). It is not always possible to define the minimum chip thickness by examining the Peak to Valley values that change depending on the feed rate (Aslantaş et al., 2022). In the literature, it is stated that the minimum chip thickness is between 20% and 30% of the cutting edge radius (Cheng and Huo, 2013). While this rate is 30% in titanium alloys (Aslantas et al., 2020), it can go up to 40% in aluminum alloys (Chen et al., 2020). In another study, it was defined that the minimum chip thickness was 17% of the edge radius (Wu et al., 2020). In this study, the minimum chip thickness is thought to be between 0.5  $\mu\text{m}$  and 1  $\mu\text{m}$ . Since the edge radius is 5  $\mu\text{m}$ , the minimum chip thickness corresponds to approximately 15% of the edge radius. Since the ploughing mechanism is effective at low feed rates (0.025, 0.05, 0.1  $\mu\text{m}/\text{tooth}$ ), it is observed that there is an instability in the  $F_x$  and  $F_y$  forces as the feed rate increases (Figure 8). The reason for this situation can be explained by the size effect in the micro milling process. Cutting forces exhibit an unstable behavior at feeds per tooth close to or below the minimum chip thickness. To eliminate the effect of ploughing, at higher feed rates (0.2, 0.5, 1, 2  $\mu\text{m}/\text{tooth}$ ), it is seen that the cutting forces increase linearly as the feed rate increases (Figure 8). This is explained by the fact that the sliding mechanism is effective, as the minimum chip thickness is increased to higher feed per tooth, similar to the conventional milling process.

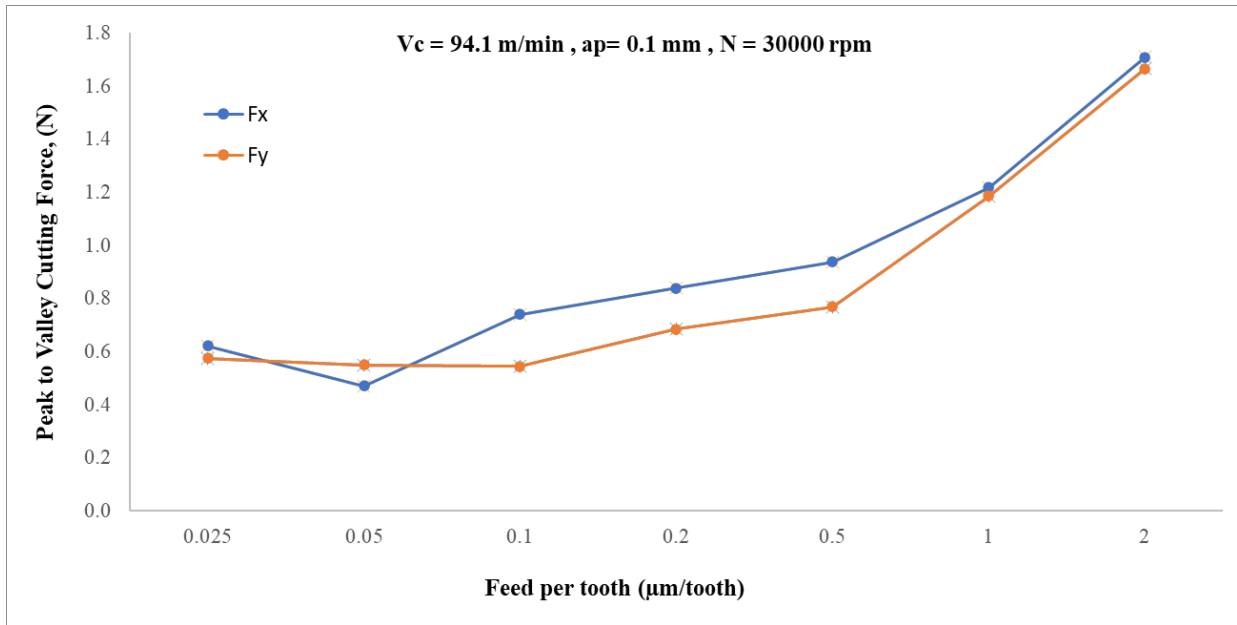


Figure 8. Cutting forces according to different feed rates

### 3.2 Thin Wall Structure Deformation

After obtaining thin wall geometry for two different feed rates with micro milling, deformation measurements were made on the wall surface using the technique in Figure 7. The measurements made separately from different heights for 0.2 µm/tooth and 1 µm/tooth feed rates are compared by graphing in Figure 9.

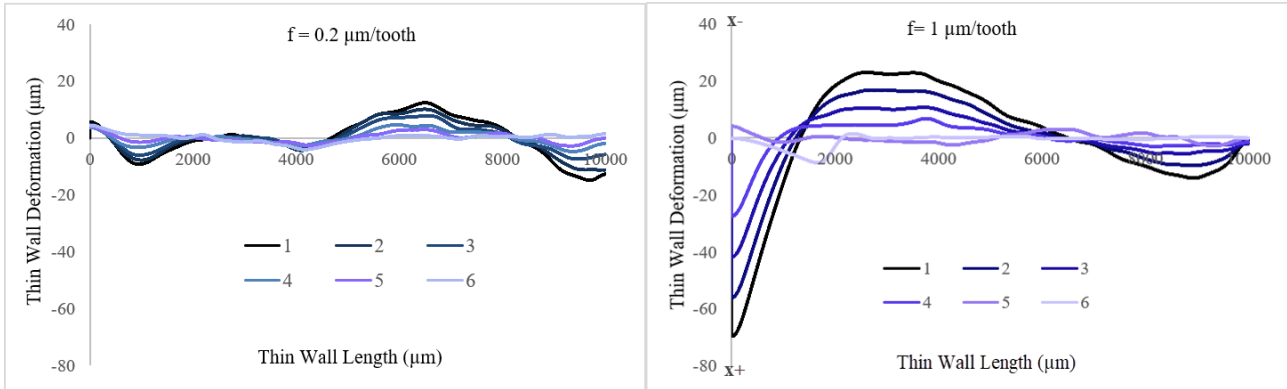


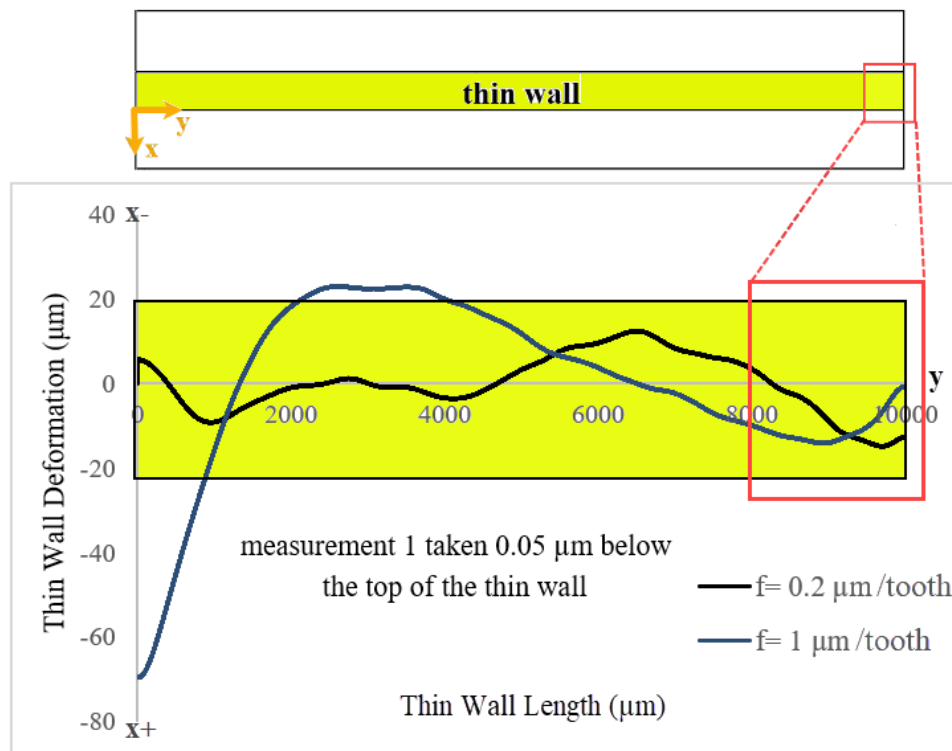
Figure 9. The change in thin-wall deformation from the upper surface of the wall to the lower surface for feed rates 0.2 µm/tooth and 1 µm/tooth

In Figure 9, it is seen that the wall deformation increases on the wall surface where the height is higher for both feed rates. The ratio of the wall height to the wall thickness decreases as one moves from the 1st measurement to the 6th measurement. Accordingly, the deformation in the lower part of the thin wall is quite small. Because the geometry is more rigid in the bottom of the wall.

Another striking point in Figure 9 is that the wall geometry micro-milled with a feed rate of 1 µm/tooth has been more deformation than the wall geometry obtained using a feed rate of 0.2 µm/tooth. At a feed rate of 1 µm/tooth, the deformation range between the end points of the workpiece is about 100 µm, while at a feed rate of 0.2 µm/tooth, the maximum deformation range is about 30 µm. This shows that there is a difference of more than three times. As the feed rate increases, the increase in cutting forces also increases the wall deformation. In this context, the results of cutting

force and wall deformation confirm each other. Considering that the wall thickness is 40  $\mu\text{m}$ , deviation in the x-axis to the wall thickness of approximately two and a half times in a thin-walled structure where the feed is 1  $\mu\text{m}/\text{teeth}$  indicates that the cutting process was not performed under optimum conditions.

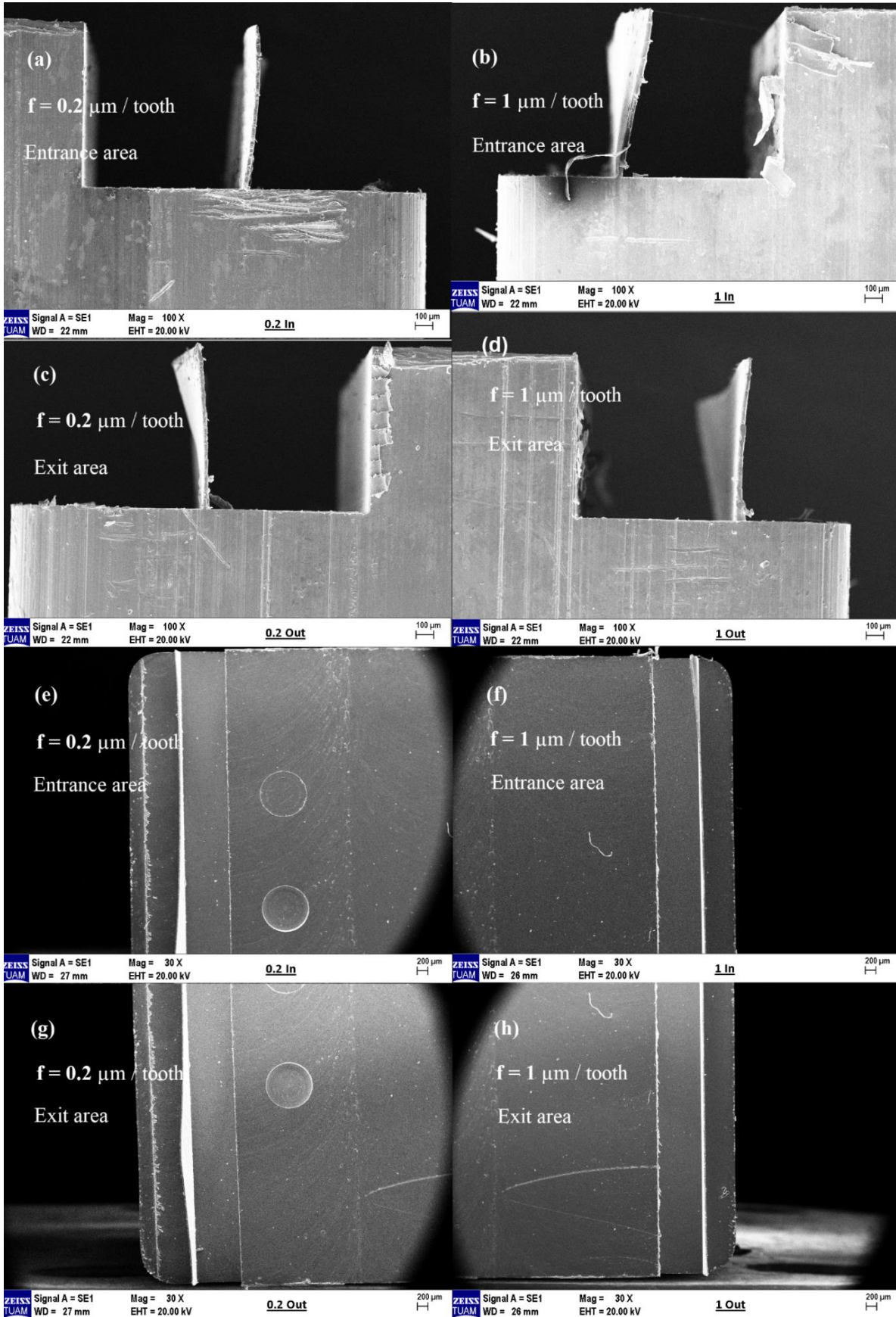
In order to observe the effect of feed on wall deformation more clearly, the number 1 measurements taken from the top / end point of the wall were compared for both feed rates (Figure 10). As stated in figure 9, it is clearly seen that the thin-wall deformation, which is subjected to micro-milling with a feed rate of 1  $\mu\text{m}/\text{tooth}$ , is quite high compared to the workpiece with a feed rate of 0.2  $\mu\text{m}/\text{tooth}$ . A better surface finish can be achieved at low feed rates, but minimum chip thickness should also be considered. Increasing wall deformation due to increased feed is much more dominant than deformation due to size effect.



**Figure 10.** Comparison of wall deformation of thin-wall structures subjected to micro-milling at two different feed rates

In Figure 11, SEM images of these two thin wall geometries are given. SEM images were taken separately from the entrance and exit areas. In Figure 10, it is seen that the deformation measurement in the entrance area of the thin wall formed with 1  $\mu\text{m}/\text{tooth}$  advance value is considerably higher than the thin wall obtained with 0.2  $\mu\text{m}/\text{tooth}$  advance value. Looking at the SEM images in Figures 11a and 11b, this result is clearly observed. The deformation images in the exit area in Figure 11c and 11d are also parallel to the deformation measurements. In Figure 11e, 11f, 11g and 11h, the top view of the wall geometry is given for both feed values. The SEM images of the thin wall match exactly with the deformation measurements made from the wall surface, which proves the accuracy of the measurements made with the optical profilometer device.





**Figure 11.** SEM images of the entrance and exit areas of thin-wall geometries created at 0.2 and 1 μm/tooth feed rates

In order to understand the cause of deformation in micro milling of thin-walled structures, it is necessary to examine the deformation mechanisms. Thin-walled structures are subject to bending as

a result of plastic deformation under the influence of external elastic loadings during cutting (Yi et al., 2019). As a result of bending, elongation occurs at certain points of the thin wall and shortening at other points. The increase in cutting forces in direct proportion to the increase in the feed rate also increases the deformation of the external loadings on the wall. It is seen that the workpiece is subjected to bending deformation at both feed rates. As it can be understood from the measurement results in Figure 9 and 10 and the SEM images in Figure 11, the bending deformation of the sample with a feed rate of 1  $\mu\text{m}/\text{tooth}$  is higher than the bending deformation of 0.2  $\mu\text{m}/\text{tooth}$ . This difference is clearly seen especially in the entrance area. As the feed rate increases, the bending deformation increases, and at much higher feed rates, fracture occurs with the increase in the loads to which the micro thin-walled structure is exposed (Xiang and Yi, 2021).

#### 4. CONCLUSIONS

In this study, differences in wall deformations were investigated by creating thin wall structures by micro-milling using Al6061-T6 material. The wall deformations of the workpieces subjected to micro-cutting at two different feed rates were compared using different measurement techniques. The important findings of the study are as follows:

- It is seen that the cutting forces increase linearly with the increase of the feed rate, but at feed values per tooth become close to the minimum chip thickness, instabilities arise in the cutting forces because of the effective ploughing mechanism.
- When the deformation measurements on the thin wall surface are examined, the deformation at the top/end point of the wall is considerably higher than the deformation at the bottom point of the wall. The deformation decreases as you go from the upper point of the thin wall to the lower point.
- It was observed that the deformation in the entrance and exit parts of the thin wall was more than the other parts.
- When the feed rates are compared in terms of wall deformation. It was observed that the deformation of the thin wall structure obtained with 1  $\mu\text{m}/\text{tooth}$  feed rate was about three times higher than the thin wall structure obtained with 0.2  $\mu\text{m}/\text{tooth}$  feed rate. This shows that the deformation caused by the increase in cutting forces is more dominant than the deformation caused by ploughing.
- Cutting forces and thin-wall deformation results show that the surface quality deteriorates with increasing feed rate.

#### 5. ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by Afyon Kocatepe University Scientific Research Projects Coordination Unit with Project number of 22. Fen. Bil.22 and TÜBİTAK 1002 Rapid Support project numbered 122M223. We thank the institutions for their support.

#### 6. CONFLICT OF INTEREST

Authors approve that to the best of their knowledge, there is not any conflict of interest or common interest with an institution/organization or a person that may affect the review process of the paper.

## 7. AUTHOR CONTRIBUTION

Ahmet Hasçelik and Kubilay Aslantaş determining the concept and design process of the research and research management, data analysis and interpretation of results, critical analysis of the intellectual content, preparation of the manuscript, and final approval and full responsibility. Besides Ahmet Hasçelik is contributed the data collection.

## 8. REFERENCES

- Akram S., Jaffery S. H. I., Khan M., Fahad M., Mubashar A., Ali L., Numerical and Experimental Investigation of Johnson Cook Material Models for Aluminum (Al 6061-T6) Alloy Using Orthogonal Machining Approach. *Advanced of Mechanical Engineering* 10(9), 1-14, 2018.
- Aslantas K., Alatrushi L. K. H., Bedir F., et. al., An Experimental Analysis of Minimum Chip Thickness in Micro-milling of Two Different Titanium Alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 234(12), 1-13, 2020.
- Aslantas K., Alatrushi L. K. H., Experimental Study on the Effect of Cutting Tool Geometry in Micro-milling of Inconel 718. *Arabian Journal for Science and Engineering* 46(3), 2327-2342, 2021.
- Aslantas K., Çiçek A., The Effects of Cooling/lubrication Techniques on Cutting Performance in Micro-milling of Inconel 718 Superalloy. *Procedia CIRP* 77, 70-73, 2018.
- Aslantas K., Danish M., Hasçelik A., Mia M., Gupta M., Ginta T., Ijaz H., Investigations on Surface Roughness and Tool Wear Characteristics in Micro-turning of Ti-6Al-4V Alloy. *Materials* 13(13), 2998, 2020.
- Aslantas K., Hascelik A., Çiçek A., Performance Evaluation of DLC and NCD Coatings in Micro-Milling of Al7075-T6 alloy. *Journal of Manufacturing Processes* 81, 976-990, 2022.
- Chae J., Park S.S., Freiheit T., Investigation of Micro-Cutting Operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46, 313-332, 2006.
- Chen Y., Wang T., Zhang G., Research on Parameter Optimization of Micro-Milling Al7075 Based on Edge-Size-Effect. *Micromachines* 11, 197, 2020.
- Cheng K., Huo D., *Micro-Cutting Fundamentals and Applications*, Wiley Publications, First Edition, United Kingdom, 2013.
- Cheng X., Liu J. C., Zheng G. M., et al. Study on Microcutting Fundamentals for Peripheral and end Cutting Edges in Micro-end-milling. *Journal of Micromechanics Microengineering* 28(1), 015011, 2018.
- Ciecielag K., Zaleski K., Milling of Three Types of Thin-Walled Elements Made of Polymer Composite and Titanium and Aluminum Alloys Used in the Aviation Industry. *Materials* 15(17), 5949, 2022.
- Dornfeld D., Min S., Takeuchi Y., Recent Advances in Mechanical Micromachining. *CIRP Annals* 55(2), 745- 768, 2006.
- Erçetin A., Aslantas K., Özgün Ö., Micro-end Milling of Biomedical TZ54 Magnesium Alloy Produced Through Powder Metallurgy. *Machining Science and Technology* 24(6), 924-947, 2020.
- Fabio O. C., Adriane L. M., Anna C. A., Study of The Cutting Forces on Micromilling of An Aluminum Alloy. *Journal of Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering* 39, 1289-1296, 2017.
- Gao X., Cheng X., Ling S., et. al., Research on Optimization of Micro-milling Process for Curved Thin Wall Structure. *Precision Engineering* 73, 296-312, 2022.

- Gao Y. Y., Ma J. W., Jia Z. Y., et al., Tool Path Planning and Machining Deformation Compensation in High-Speed Milling for Difficult-to-Machine Material Thin-walled Parts with Curved Surface. *The International Journal of Advanced Manufacturing* 84, 1757-1767, 2016.
- Hasçelik A., Aslantaş K., Mikro Tornalama İşleminde Kesici Takım Burun Yarıçapının Kesme Kuvvetlerine Etkisi. *Journal of Materials and Mechatronics: A* 2(1), 13-25, 2021.
- Khandagale P., Bhakar G., Kartik V., Joshi S. S., Modelling Time-Domain Vibratory Deflection Response of Thin-Walled Cantilever Workpieces During Flank Milling. *Journal of Manufacturing Processes* 33, 278-290, 2018.
- Kim C. J., Bono M., Ni J., Experimental Analysis of Chip Formation in Micro Milling. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME* 30, 247-254, 2002.
- Lazoglu I., Mamedov A., Deformation of Thin Parts in Micromilling. *CIRP Annals* 65, 117-120, 2016.
- Li P. F., Liu Y., Gong Y. D., Liang L. L., Iterative Finite Element Method for Predicting Deformations of Micro Thin Wall. *Journal of Northeastern University Natural Science* 39, 527-531, 2018.
- Li P., Zdebski D., Langen H. H., et al., Micromilling of Thin Ribs with High Aspect Ratios. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 20(11), 115013, 2010.
- Loehe J., Zaeh M. F., Roesch O., In-process Deformation Measurement of Thin-Walled Workpieces. *Procedia CIRP* 1, 546-551, 2012.
- Ramanaiah B. V., Manikanta B., Ravi Sankar M., et al., Experimental Study of Deflection and Surface Roughness in Thin Wall Machining of Aluminum Alloy. *Materials Today: Proceedings* 5(2), 3745-54, 2017.
- Shimada S., Ikawa N., Tanaka H., Ohmuri G., Uchikoshi J., Yoshinaga H., Feasibility Study on Ultimate Accuracy in Microcutting Using Molecular Dynamics Simulation. *CIRP Annals* 42, 91-94, 1993.
- Sun X., Cheng K., Micro/Nano-Machining through Mechanical Cutting. *Micro-Manufacturing Engineering and Technology*, 24-38, 2010.
- Warsi S. S., Jaffery S. H. I., Ahmad R., et al., Development of Energy Consumption Map for Orthogonal Machining of Al 6061-T6 Alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 232, 14, 2017.
- Wu X., Liu L., Du M., et al., Experimental Study on the Minimum Undeformed Chip Thickness Based on Effective Rake Angle in Micro Milling. *Micromachines* 11(10), 924, 2020.
- Xiang J., Yi J., Deformation Mechanism in Wax Supported Milling of Thin-walled Structures Based on Milling Forces Stability. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 32, 356-369, 2021.
- Yarin L., Musyak A., Hetsroni G., *Fluid Flow, Heat Transfer and Boiling in Micro-Channels*, Springer Berlin Heidelberg, p. 495, 2009.
- Yi J., Wang X., Jiao L., Xiang J., Yi F., Research on Deformation Law and Mechanism for Milling Micro Thin Wall with Mixed Boundaries of Titanium Alloy in Mesoscale. *Thin-Walled Structure* 144, 106-329, 2019.
- Yuan Z. J., Zhou M., Dong S., Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface Integrity in Ultra Precision Machining. *Journal of Materials Processing Technology* 62(4), 327-330, 1996.

---

Araştırma Makalesi / Research Article

---

**Balance Control of a Flywheel Inverted Pendulum by Fuzzy Logic Controller**

Hüseyin Oktay Erkol<sup>1</sup>, Cemil Közkurt<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical Engineering, Bandırma, Balıkesir, Turkey,

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-3595-175X>, herkol@banu.edu.tr

<sup>2</sup> Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Transportation Engineering, Bandırma, Balıkesir, Turkey,

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0003-1407-9867>, ckozkurt@banu.edu.tr

**Geliş/ Received:** 10.11.2022;

**Kabul / Accepted:** 27.02.2023

**ABSTRACT:** In this study, a flywheel inverted pendulum was modeled as simulation. The model controlled by fuzzy logic and PID controller for comparison. Fuzzy logic controllers were designed using triangular and Gaussian membership functions and various methods that are "and", "implication" and "aggregation". All gains from fuzzy logic controllers and PID were tuned by the trial-and-error method. The best performance was obtained by fuzzy logic controller that uses a triangular membership function and "prob/probor" functions. The results were evaluated in terms of three phenomena. In terms of Settling Time and Maximum Overshoot, Fuzzy Triangle MF with 0.15 s and 0 degrees, respectively, and PID and Fuzzy Triangle MF models with 0 degrees in terms of Steady-State error achieved the best success. In addition, the robustness of the control system was tested by applying two different types of disturbance inputs, random and impulse. The results show that fuzzy logic is a good alternative for balance control of a flywheel inverted pendulum, but PID has an acceptable performance.

**Keywords:** Flywheel Inverted Pendulum, Balance Control, Fuzzy Logic, Simulation.

---

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: ckozkurt@banu.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Erkol, H.O., Közkurt, C. (2023). Balance Control of a Flywheel Inverted Pendulum by Fuzzy Logic Controller. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 147-160.

## 1. INTRODUCTION

Inverted pendulum is a popular and important tool in control theory. There are many different types of inverted pendulum in literature. Classic inverted pendulum systems are designed to move on a fixed linear mechanism. Some of others are two-wheeled inverted pendulums (Nawawi et al., 2008; Wasiwitono et al., 2021; Wu et al., 2012) and one-wheel inverted pendulums (Han et al., 2014; Moghadam and Marshall, 2021). They can move each direction on a two-dimensional surface by the wheels. During the movement, the body acts as an inverted pendulum and it must be balanced by the horizontal forces produced by the motion of the base of the pendulum. Another one is flywheel inverted pendulum (Andrievsky, 2011; Meyer et al., 2009; Olivares and Albertos, 2013). It is fixed on a horizontal surface by a rotational joint and has a flywheel on the top of the body. It can also have two degrees of freedom like Cubli (Bobrow et al., 2020; Gajamohan et al., 2012). Cubli is a robot in the form of a cube and it can balance on any one of its corners.

An inverted pendulum system has a nonlinear characteristic and balance control is a difficult process. Many times, controllers are designed using the linearized models of the system. Many types of controllers have been implemented to inverted pendulums. Jain et al. designed an inverted pendulum system and used PID controllers to stabilize the pendulum and control the position (Jain et al., 2013). They also used particle swarm optimization algorithm to tune the PID coefficients. Conventional methods for tuning the PID parameters are based on trial-and-error method. With optimization algorithms, the same process can be completed in a shorter time.

Linear quadratic regulator (LQR) and full-state feedback (FSF) are other control methods that can be used for an inverted pendulum. Razmjoooy and Alikhani used LQR and FSF techniques and made a performance comparison (Razmjoooy et al., 2014). The results showed that LQR has a better performance; because of which it is an optimal control technique of pole placement.

Similar studies are made for two wheel inverted pendulum, too. Villacrés et al. made a comparative study for controlling a two wheel inverted pendulum (Villacrés et al., 2016). PID controller, LQR and sliding mode control (SMC) are compared in the study. The results showed that SMC has the best performance and PID is an easy tunable controller. In another study, line tracking control of a two wheel inverted pendulum was made using visual feedback (Hatada et al., 2022).

Fractional order controllers are another option to control an inverted pendulum. There are various studies which are used fractional PID controllers for inverted pendulum, also include comparisons between PID controllers and fractional PID controllers (Mishra and Chandra, 2014; Mondal and Dey, 2022; Wang et al., 2016). They all reported that both of the PID and fractional PID had quite acceptable performance, but fractional PID was more robust.

In this study, a flywheel inverted pendulum model that is linearized is controlled by fuzzy logic controller. A controller is designed for high performance by examining the effects of the fuzzy logic controller parameters. The designed controller is also compared to a conventional PID controller.

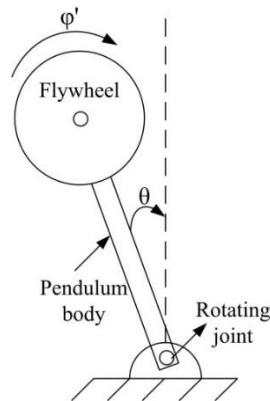
## 2. FUZZY LOGIC CONTROL

Fuzzy logic is one of the popular tools in control theory. It can be used to control linear or non-linear systems. A fuzzy logic controller can have single-input or multi-input. Among multi-input fuzzy controllers, two-input ones are more preferred in terms of sensor and computational cost. The inputs are generally the error of system state which must be controlled and the derivative of it. The first step of a fuzzy logic control is fuzzification. In this step, the input data are converted into fuzzy data or membership functions. The second step is fuzzy inference process, and membership functions

and predefined rules are combined to derive fuzzy output. The fuzzy rules or rule table which include the all possible combination of inputs and outputs are specific to the system, and must be prepared by the help of an expert (Özmen and Közkurt, 2021). The last step of the fuzzy logic control is defuzzification. In this step, fuzzy outputs are calculated using different methods such as center of sums (COS), center of gravity (COG), weighted average method or maxima methods. The outputs are applied to the system and the output error which is the input of the fuzzy logic controller is calculated again. Many times, the inputs and the outputs of a fuzzy logic controller need a gain value many times. The gains have an important effect on the control performance of the fuzzy logic controller and they can be selected by trial-and-error method. Detailed information about fuzzy logic control can be found in (Bai and Wang, 2006; Tavana and Hajipour, 2019).

### 3. FLYWHEEL INVERTED PENDULUM

Inverted pendulum is popular system, which is naturally nonlinear and unstable, in control theory. Inverted pendulum balance researches are basically made on an inverted pendulum on a cart and the aim is balancing the pendulum by moving the cart (Erkol, 2017; Mishra and Chandra, 2014; Niemann and Poulsen, 2003). The Inverted pendulum system used in this study has different structure based on a flywheel (Gajamohan et al., 2012; Huang et al., 2022; Prutskii et al., 2022). A simplified drawing of the system is given in Fig. 1. The system is fixed on the ground by a rotating joint and a flywheel is placed on top of the pendulum. When the flywheel is turning, a reaction torque becomes on the vertical plane. The direction of the reaction torque changes depending on the turning direction of the flywheel. The reaction torque also decreases or increase with the speed of the flywheel. In this way, inverted pendulum balance can be controlled by adjusting the flywheel speed and changing the turning direction. It means the input of the system is the torque driven by the flywheel.



**Figure 1.** Basic structure of the flywheel inverted pendulum,0

The differential equations of the system can be derived using Euler-Lagrange method. The equations of the system given in Fig. 1 is given in equation 1-4 (Ruan and Wang, 2010).  $I_1$  and  $I_2$  are the inertia of the pendulum and flywheel,  $m_1$  and  $m_2$  are the weights of the pendulum and flywheel,  $f_1$  and  $f_2$  are the friction factors,  $g$  is the gravitational constant and  $l_1$  is the pendulum length.

$$(a + I_2^2)\ddot{\theta} + I_2\ddot{\phi} = b\sin\theta - b_1\dot{\theta} \quad (1)$$

$$I_2(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}) = u - b_2\dot{\phi} \quad (2)$$

$$a = m_1 l^2 + 4m_2 l^2 + I_1 \quad (3)$$

$$b = (m_1 + 2m_2)gl \quad (4)$$

When the  $\theta$  is small enough, the equations can be linearized as given in equation 5-6 and the state space equation can be obtained as in equation 7 (Ruan and Wang, 2010). The system parameters are given in Table 1.

$$(a + I_2^2)\ddot{\theta} + I_2\ddot{\phi} = b\theta - f_1\dot{\theta} \quad (5)$$

$$I_2(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}) = u - f_2\dot{\phi} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{b}{a} & -\frac{f_1}{a} & 0 & \frac{f_2}{a} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{b}{a} & \frac{f_1}{a} & 0 & -f_2 \frac{a+I_2}{aI_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{a} \\ 0 \\ \frac{a+I_2}{aI_2} \end{bmatrix} \tau \quad (7)$$

**Table 1.** System Parameters

Symbol	Value	Unit
$L$	0.25	m
$m_1$	1.2	kg
$m_2$	0.46	kg
$I_1$	$2.504 \times 10^{-2}$	Kgm <sup>2</sup>
$I_2$	$3.423 \times 10^{-3}$	Kgm <sup>2</sup>
$f_1$	$9.4 \times 10^{-3}$	Nm/V
$f_2$	$3 \times 10^{-4}$	Nm.s

#### 4. EXPERIMENTAL STUDY BASED ON SIMULATED MODELS

In this study, a flywheel pendulum was modeled and a fuzzy logic controller was designed to balance the pendulum. All study was made by simulations using MATLAB/Simulink program. Firstly, the system was controlled by a PID controller to see the performance and make comparisons. The structure of the PID controlled system is given in Fig. 2. The PID was tuned by auto tune property of the MATLAB, and then the controller performance was improved by manual tuning. All settling time and overshoot values were calculated with 2% tolerance. The system outputs are given in Fig. 3. The settling time (S.T.) and the maximum overshoot (M.O.S.) of the  $\theta$  output are respectively 1.091s and  $0.212^\circ$  when the auto tune is used. The performance can be improved by manual tuning after auto tuning. The S.T. and M.O.S. are respectively 0.227s and  $0.146^\circ$  for the manually improved system, respectively.



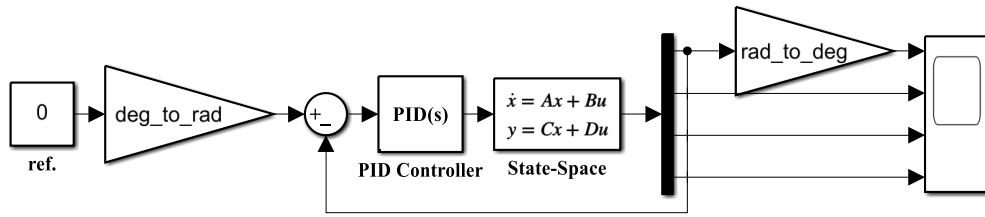


Figure 2. Block diagram of the system controlled by PID

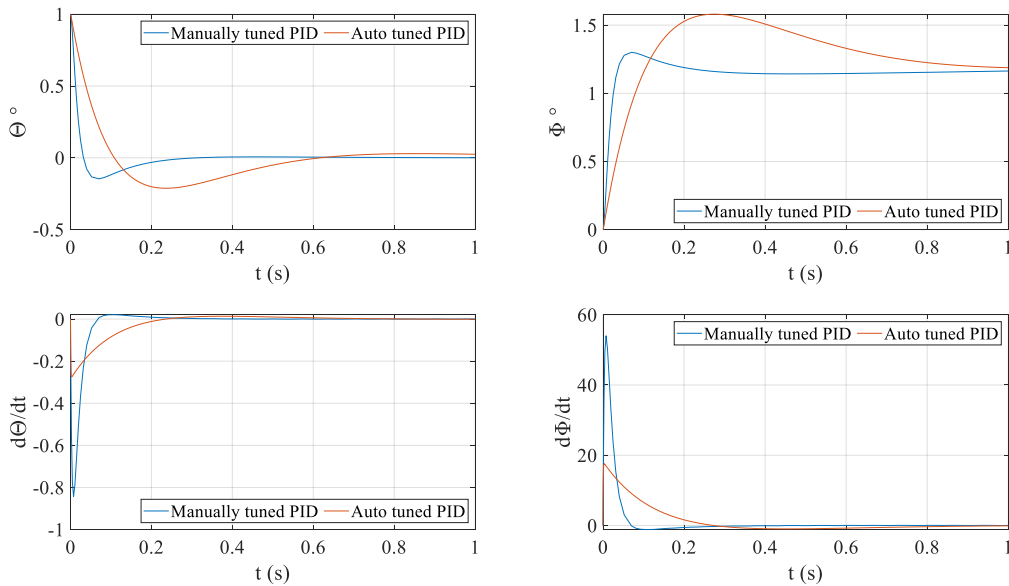


Figure 3. Output graphs of the PID controlled system

### 4.1. Fuzzy Models

The main aim of the study is to design a fuzzy logic controller for a better performance than classical methods like PID. The simulation design for fuzzy logic control is given in Fig. 4. The designed controller has two inputs; the error, and the derivative of the error. Both of the inputs have gains ( $K_e$  and  $K_{de}$ ), and the controller output has also a gain ( $K_{out}$ ). It should be noticed that  $K_{out}$  has a negative sign because of the rule table and characteristic of the system. All of the gains have important effects on the controller performance. The used rule table is given in Table 2.

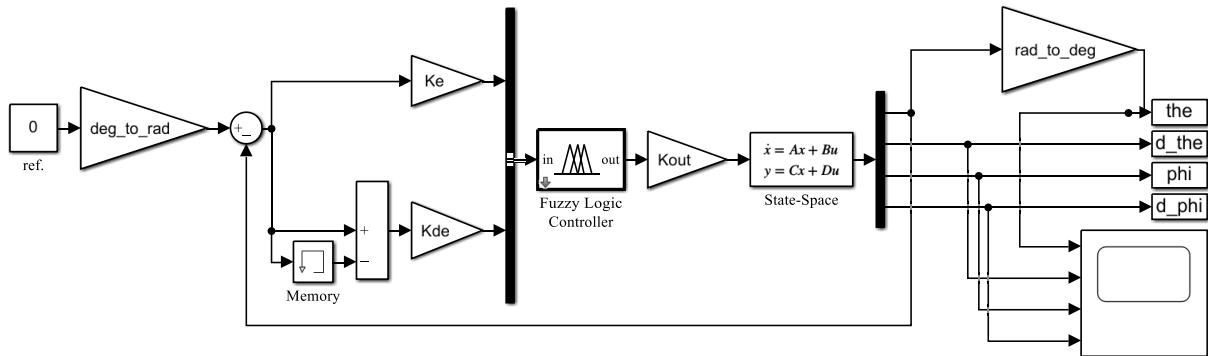
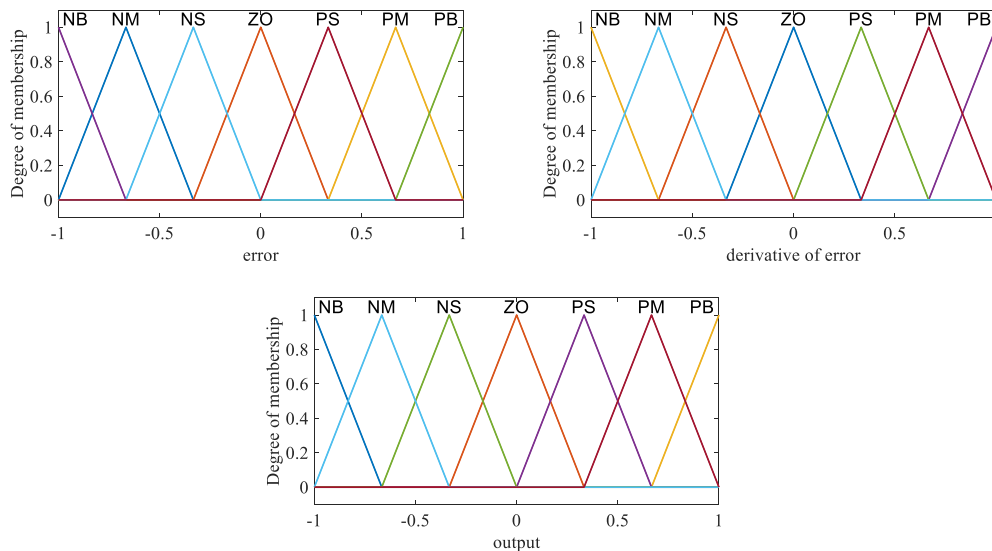


Figure 4. Block diagram of the system controlled by fuzzy logic controller

**Table 2.** The rule table of the fuzzy logic controller

$\theta'$ \ $\theta$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZO	PS	PS	PM	PM	PB	PB

Two types of membership function (MF) were used. Different “And”, “Or”, “Implication” and “Aggregation” methods were used to see their effects on the performance. Firstly, triangular MF given in Fig. 5 was used. Input and output ranges of the functions were determined between “-1” and “1”. Inputs and outputs were scaled by the gains of  $K_e$ ,  $K_{de}$  and  $K_{out}$ . “And” method and “implication” methods were chosen as “min”. “Or” method and “aggregation” methods were chosen as “max”. Selected methods can be seen in Table 3.

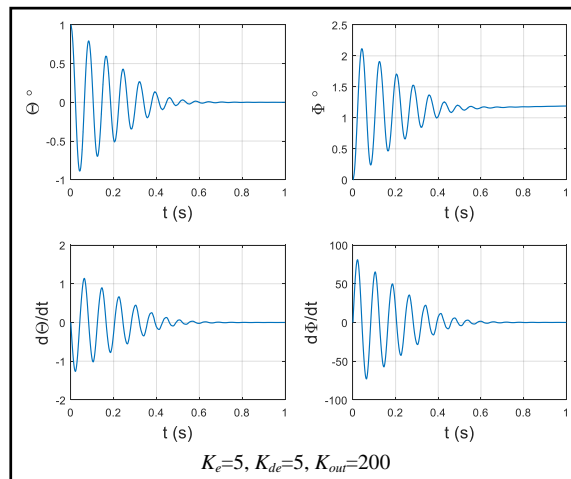


**Figure 5.** Triangle membership functions of error and derivative of error inputs and the output

**Table 3** Parameters of the fuzzy logic controllers

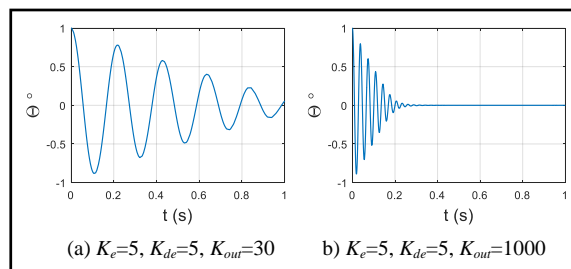
Parameters	Membership Functions	
	Triangle	Gaussian
And Method	min	prod
Or Method	max	max
Implication	min	prod
Aggregation	max	probor
Defuzzification	centroid	centroid

Then the gains were manually tuned for the best performance. Firstly,  $K_e$ ,  $K_{de}$  and  $K_{out}$  were selected as respectively 5, 5, and 200, respectively. Initial  $\theta$  angle was selected as  $1^\circ$ . The system reached to the reference ( $0^\circ$ ) in more than 0.5s. The system output had also much oscillation. The graphs of system outputs are given in Fig. 6.



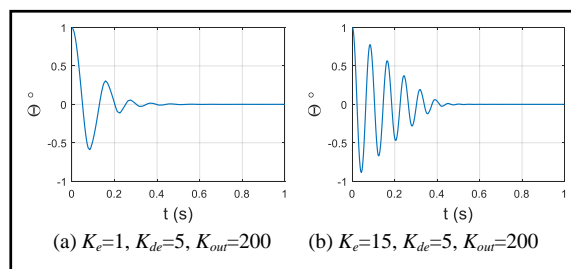
**Figure 6.** System outputs of the fuzzy logic controller which has triangle MF

$K_{out}$  was changed to improve system performance. The system had more settling time when  $K_{out}$  was decreased, and it had shorter settling time when  $K_{out}$  was increased. System had much oscillation again. The  $\theta$  graphs are given in Fig. 7.

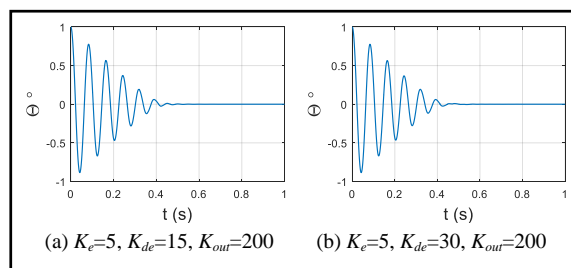


**Figure 7.** The effect of  $K_{out}$  on  $\theta$

The system had less oscillation when  $K_e$  was decreased and more oscillation when  $K_e$  was increased. The effect of  $K_e$  gain can be seen in Fig. 8. Small changes of the  $K_{de}$  do not have a significant effect on the system performance as seen as Fig. 9.

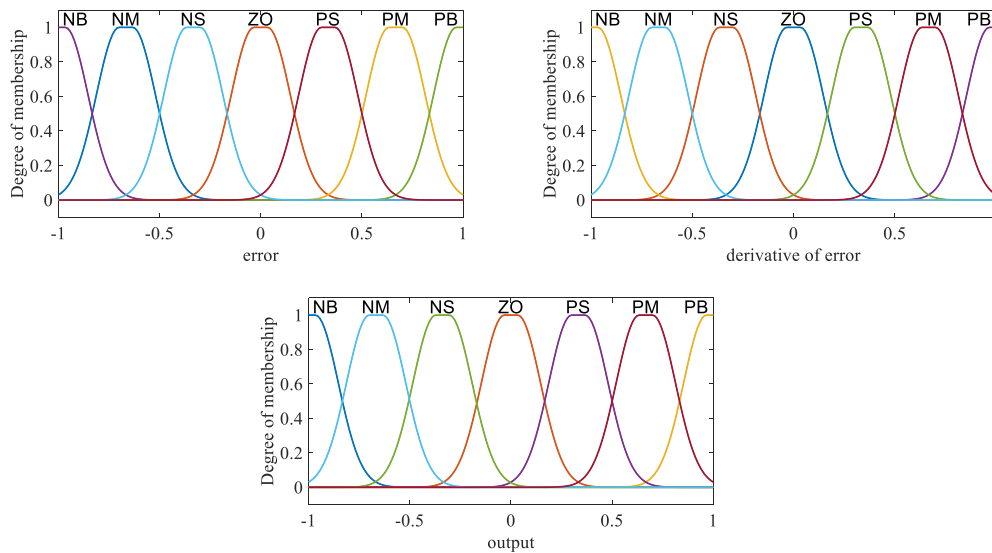


**Figure 8.** The effect of  $K_e$  on  $\theta$

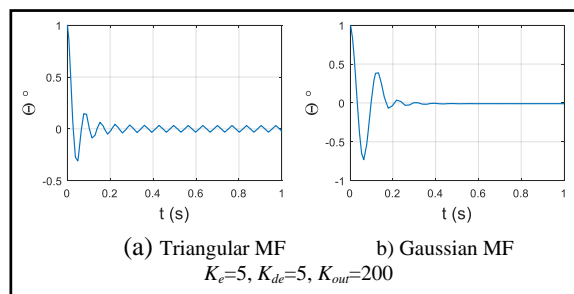


**Figure 9.** The effect of  $K_{de}$  on  $\theta$

A good performance couldn't be obtained by the tunings given above, but it is possible by changing some parameters of fuzzy logic controller. As seen in Table 3, "And method" and "implication method" were selected as "product" (prod); "aggregation method" was selected as "probabilistic or" (probor); and "Or method" was selected as "max". These parameters were used with both of triangular and Gaussian (gauss2mf) MF given in Fig. 10. The system performance was better with both of triangular and Gaussian MF when used with the new parameters. The  $\theta$  output graphs of triangular and Gaussian MF are given in Fig. 11 for  $K_e=K_d=5$  and  $K_{out}=200$ . Both of them generated shorter settling time and less oscillation.

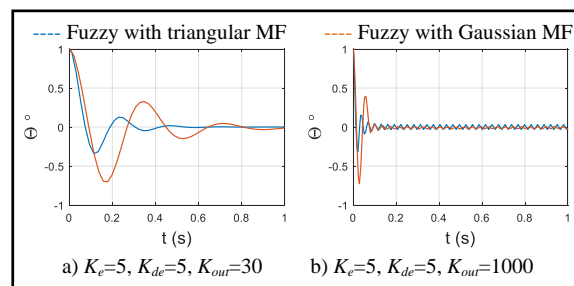


**Figure 10.** Gaussian membership functions of error and derivative of error inputs and the output



**Figure 11.** The effect of new parameters on  $\theta$

The effect of  $K_{out}$  for  $\theta$  output can be seen in Fig. 12. System has longer settling time and less oscillation for small  $K_{out}$ . In a similar manner, it has shorter settling time and more oscillation for bigger  $K_{out}$ .



**Figure 12.** The effect of  $K_{out}$  on  $\theta$  when prod, probor and max functions are used

The system output had no oscillation but longer settling time when  $K_e$  was decreased, and the system output had more oscillation and shorter settling time when  $K_e$  as increased. It can be seen in Fig. 13 that  $K_{de}$  has also a positive effect on the system performance. System output has shorter settling time with bigger  $K_{de}$  gain as seen as in Fig. 14.

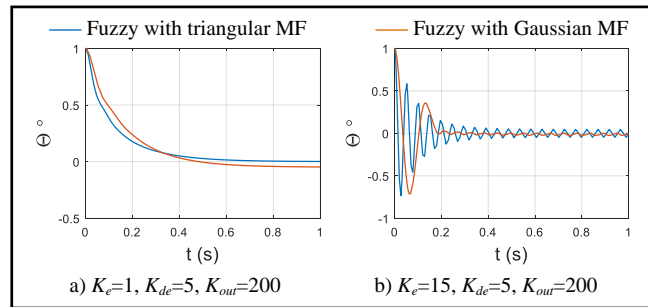


Figure 13. The effect of  $K_e$  on  $\theta$  output when prod, probor and max functions are used

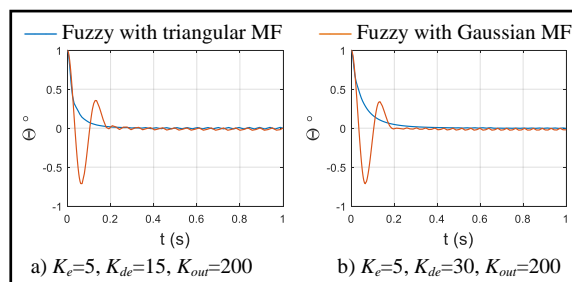


Figure 14. The effect of  $K_{de}$  on  $\theta$  output when prod, probor and max functions are used

When used the triangular MF; the settling time was 0.150s with %2 tolerance, and there was no overshoot and steady-state error. When used the Gaussian MF; the settling time was 0.325s with %2 tolerance, max overshoot was  $0.352^\circ$ , and steady-state error is  $0.019^\circ$ . The system output graphs are given in Fig. 15.

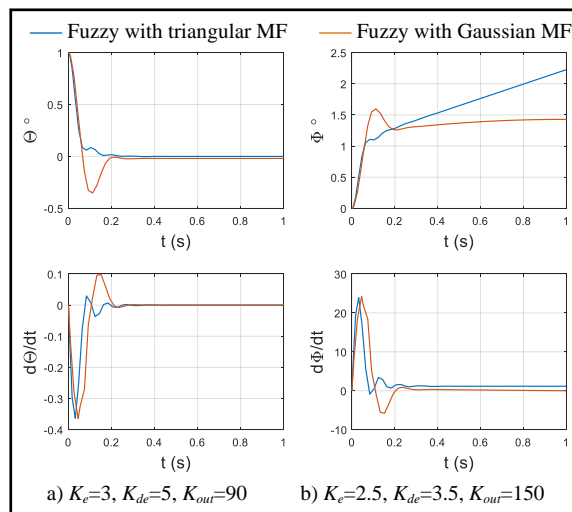


Figure 15. System outputs when used the optimized fuzzy logic controllers

Settling time, maximum overshoot and steady state errors are given in Table 4 for PID and fuzzy controlled systems. Fuzzy logic controller which has triangle MF has the best results. It's settling time is 0.15s and there are no maximum overshoot and steady-state error. The settling time of fuzzy logic controller which uses Gaussian MF is more than two times of fuzzy logic controller which has triangle MF. It has also maximum overshoot and steady-state error.

**Table 4.** Performance comparison

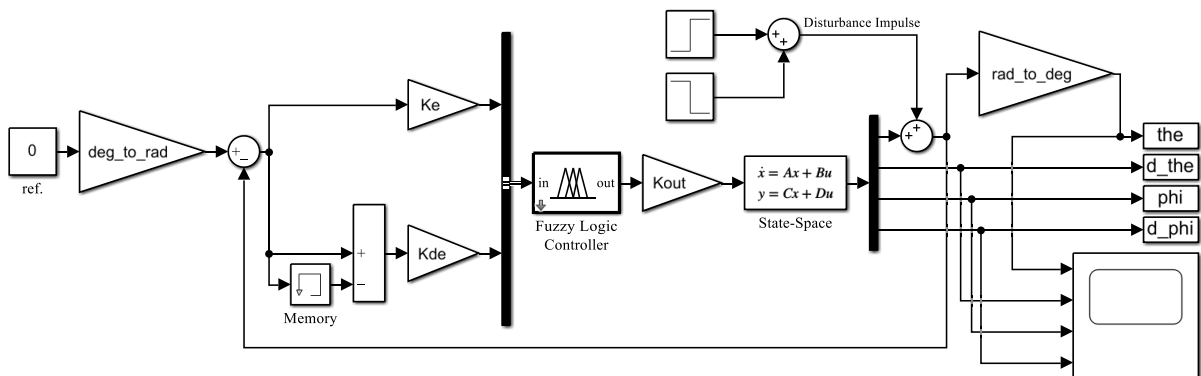
Performance Criteria	PID	Fuzzy Triangle MF	Fuzzy Gauss MF
Settling Time (s)	0.227	0.150	0.325
Maximum Overshoot (°)	0.146	0	0.352
Steady-State error (°)	0	0	0.019

The PID controller has an acceptable second best performance. Its settling time is more than fuzzy logic controller which uses triangle MF, but it is less than fuzzy logic controller which uses Gaussian MF. PID controller has also overshoot, but it is half of the maximum overshoot value of the fuzzy logic controller which uses Gaussian MF. It has also no steady-state error.

As a result, the controller which has the best performance is the fuzzy logic controller which uses triangle MF. The second best is the PID controller and the third one is the fuzzy logic controller which has Gaussian MF. It can be concluded that the fuzzy logic controller better than PID, when its parameters are selected correctly and the gains are tuned carefully.

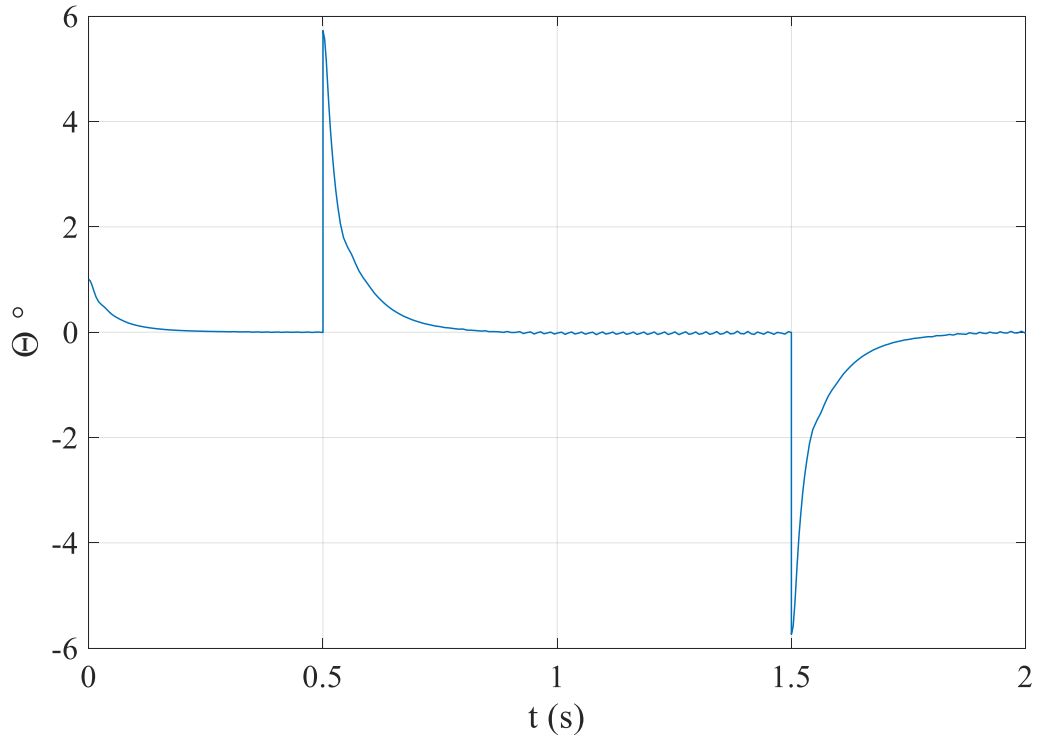
**4.2. Disturbance Inputs to The Best Performance Model**

Robustness is tested by applying two different disturbance inputs to the triangular membership function model, which is the best performance model. An input with a duration of 1 second and an amplitude of 0.1 is applied at the 0.5 second moment of the simulation as the disturbance pulse function. Fig. 16 shows the method of applying the disturbance pulse input by forming it with unit step functions.



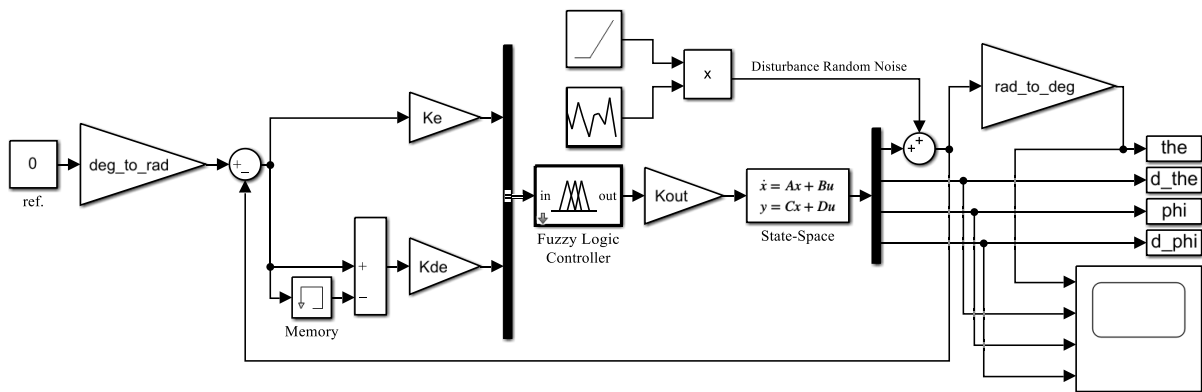
**Figure 16.** Simulink model with disturbance impulse input

Although the flywheel inverted pendulum model with disturbance input could not maintain the balance during the pulse, it immediately recovered when the pulse was retracted and settled in a stable control position. The response graph is shown in Fig. 17.



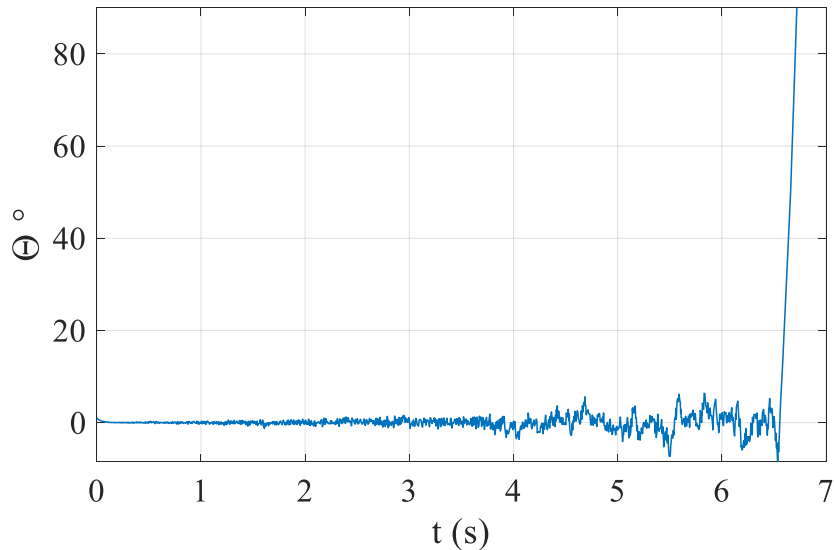
**Figure 17.** Response graph of the model with disturbance impulse input

Random noise disturbance input is applied secondary to the triangular membership function model. The random noise function is given by multiplying the ramp function with increasing amplitude, and thus the robustness of the control system is tested up to how many degrees of noise. Fig. 18 shows the method of applying the disturbance random input.



**Figure 18.** Simulink model with disturbance random noise input

As a result of this input, it is seen in Fig. 19 that the control system can provide the balance up to a certain amplitude of the noise. When the noise reaches about  $\pm 8^\circ$  amplitudes, the control system loses its robustness.



**Figure 19.** Response graph of the model with disturbance random noise input

In experimental studies, two different disturbance input methods were applied to test the robustness of the fuzzy logic controller in terms of amplitude and duration. In the literature, this test is usually provided with a single disturbance input (Olivares and Albertos, 2013; Ruan and Wang, 2010; Vasconcelos et al., 2019).

## 5. CONCLUSION

In this study, a fuzzy logic controller was designed and optimized by trial-and-error method for a flywheel inverted pendulum. Balance control is the main challenge in controlling an inverted flywheel pendulum. All fuzzy gains were tuned for the best performance. Also, some different functions were used for fuzzy methods like implication and aggregation. Fuzzy logic controller which uses triangular MF with “prod” and “probor” functions for and-implication-aggregation methods has the best performance in controlling the inverted pendulum. Fuzzy Logic controller which uses Gaussian MF has more overshoot and longer settling time. The designed fuzzy logic controllers are compared with a PID controller tuned by trial-and-error method again. The PID controller has an acceptable performance. Its performance is not good as fuzzy logic controller which uses triangular MF. PID has maximum overshoot and 0.077s longer settling time. However, it has better performance than fuzzy logic controller which uses Gaussian MF. PID controller has 0.098s shorter settling time, and 2.41 times less overshoot. It has also no steady state error. In experimental studies, two different disturbance input methods were applied to test the robustness of the fuzzy logic controller in terms of amplitude and duration. The best performance triangular MF model is robust under disturbance inputs.

The fuzzy logic controller which uses triangular MF has better performance when compared with the PID controller. But all tuning processes are made by trial-and-error method. An optimization algorithm should be used to make a more accurate comparison. It can be a future work. After all, fuzzy logic controller is a good choice when controlling a flywheel inverted pendulum.



## 6. CONFLICT OF INTEREST

Authors approve that to the best of their knowledge, there is not any conflict of interest or common interest with an institution/organization or a person that may affect the review process of the paper.

## 7. AUTHOR CONTRIBUTION

Author 1: Conceptualization, Data Curation, Software, Visualization, Writing-original draft, Supervision, Methodology.

Author 2: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Visualization, Formal Analysis, Writing - Review and Editing.

## 8. REFERENCES

- Andrievsky B. R., Global stabilization of the unstable Reaction-Wheel Pendulum. *Automation and Remote Control*, 72(9), 1981–1993, 2011.
- Bai Y., Wang D., Fundamentals of Fuzzy Logic Control—Fuzzy Sets, Fuzzy Rules and Defuzzifications. In *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*, Springer, London, pp. 17–36, 2006.
- Bobrow F., Angelico B. A., da Silva P. S. P., The Cubli: Modeling and Nonlinear Control Utilizing Unit Complex Numbers (arXiv:2009.14625), 2020.
- Erkol H. O., Ters Sarkaç Sisteminin Yapay Arı Kolonisi Algoritması ile Optimizasyonu. *Journal of Polytechnic*, 20(4), 863–868, 2017.
- Gajamohan M., Merz M., Thommen I., D’Andrea R., The Cubli: A cube that can jump up and balance. *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3722–3727, 2012.
- Han H. Y., Han T. Y., Jo H. S., Development of omnidirectional self-balancing robot. *2014 IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA)*, September, 57–62, 2014.
- Hatada K., Sato M., Hirata K., Masui Y., Synthesis of a Calibration-Free Visual Feedback Controller for an Inverted Pendulum Using a Fisheye Lens. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(12), 13348–13358, 2022.
- Huang H., Li Z., Guo Z., Guo J., Suo L., Wang, H., Prescribed Performance Adaptive Balance Control for Reaction Wheel-Based Inverted Pendulum-Type Cubli Rovers in Asteroid. *Aerospace*, 9(11), Article 11, 2022.
- Jain N., Gupta R., Parmar G., Intelligent Controlling of an Inverted Pendulum Using PSO-PID Controller. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, 2(12), 3712–3716, 2013.
- Meyer J., Delson N., De Callafon R. A., Design, modeling and stabilization of a moment exchange based inverted pendulum. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 15(PART 1), 462–467, 2009.
- Mishra S. K., Chandra D., Stabilization and Tracking Control of Inverted Pendulum Using Fractional Order PID Controllers. *Journal of Engineering*, 1–9, 2014.
- Moghadam A. A. A., Marshall M., Robust Control of the Flywheel Inverted Pendulum System Considering Parameter Uncertainty. *2021 American Control Conference (ACC)*, 1730–1735, 2021.

- Mondal R., Dey J., A novel design methodology on cascaded fractional order (FO) PI-PD control and its real time implementation to Cart-Inverted Pendulum System. *ISA Transactions*, 130, 565–581, 2022.
- Nawawi S. W., Ahmad M. N., Osman J. H. S., Real-Time Control of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot. *Engineering and Technology*, 2(3), 406–412, 2008.
- Niemann H., Poulsen J. K., Analysis and design of controllers for a double inverted pendulum. *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, 4, 2803–2808, 2003.
- Olivares M., Albertos P., On the linear control of underactuated systems: The flywheel inverted pendulum. *2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, November, 27–32, 2013.
- Özmen İ., Közkurt C. (2021). Design of Fuzzy Logic Supported Car Driver Control System. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 5(3), Article 3,2021
- Prutskii A. S., Mikhalkov N. V., Vasiliev E. Y., Synthesis technique for control of a CMG Stabilization of an inverted pendulum which does not require repeated code generation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2373(9), 092005, 2022.
- Razmjoooy N., Madadi A., Alikhani H.-R., Mohseni M., Comparison of LQR and Pole Placement Design Controllers for Controlling the Inverted Pendulum. *Journal of World's Electrical Engineering and Technology (JWEET)*, 3(2), 83–88, 2014.
- Ruan X. G., Wang Y. F., The modelling and control of flywheel inverted pendulum system. *Proceedings - 2010 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, ICCSIT 2010*, 6, 423–427., 2010
- Tavana M., Hajipour V., A practical review and taxonomy of fuzzy expert systems: Methods and applications. *Benchmarking: An International Journal*, 27(1), 81–136, 2019.
- Vasconcelos J. R. C., González E. M. A., Foyo P. M. G. D., Design and Control of a Flywheel Inverted Pendulum System. *Congresso Brasileiro de Automática - CBA*, 1(1), Article 1, 2019.
- Villacrés J., Viscaino M., Herrera M., Camacho, O., Controllers Comparison to stabilize a Two-wheeled Inverted Pendulum: PID , LQR and Sliding Mode Control 2 Description of the Two Wheeled Inverted Pendulum. *Controllers Comparison to Stabilize a Two-Wheeled Inverted Pendulum: PID, LQR and Sliding Mode Control*, 1(January), 29–36, 2016.
- Wang C., Yin G., Liu C., Fu W., Design and simulation of inverted pendulum system based on the fractional PID controller. *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 5, 1760–1764, 2016.
- Wasiwitono U., Wahjudi A., Saputra A. K., Yohanes, Stabilization and disturbance attenuation control of the gyroscopic inverted pendulum. *Journal of Vibration and Control*, 27(3–4), 415–425, 2021.
- Wu J., Zhang W., Wang S., A Two-Wheeled Self-Balancing Robot with the Fuzzy PD Control Method. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 1–13, 2012.

Araştırma Makalesi / Research Article

Alan ısıtma uygulamalarında toprak kaynaklı ısı pompasının doğalgaz sistemine alternatif olarak değerlendirilebilmesi için optimum teşvik miktarının belirlenmesi

Abdullah KAPICIOĞLU

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2982-0312>, akapicioglu@cumhuriyet.edu.tr

Geliş/ Received: 28.11.2022;

Kabul / Accepted: 17.03.2023

**ÖZET:** Türkiye farklı iklim kuşaklarını içinde barındıran nadir ülkelerden biridir. Oldukça soğuk bölgelerinin yanında ılıman iklim gösteren bölgeleri de bulunmaktadır. Bu çeşitlilik iklimlendirme uygulamalarında tek tip bir yöntem kullanılmasını da sınırlamaktadır. Güneyinde yer alan illerde ısıtma uygulamalarında çoğu zaman geleneksel elektrikli ısıtıcılar yeterli olurken, diğer bölgelerde yoğun olarak doğalgaz kullanılmaktadır. Diğer taraftan toprak kaynaklı ısı pompaları dünyada alternatif iklimlendirme sistemleri olarak kullanılmaya başlamıştır. Fakat bu sistemlerin ilk kurulum maliyetleri kullanımını oldukça sınırlamaktadır. Fakat son yıllarda enerji arzında yaşanan sorunlar özellikle de Avrupa bölgesindeki doğalgaz arzındaki sıkıntılar ciddi boyutlara ulaşmıştır. Bu kapsamda, bu çalışmada ısıtma uygulamalarında toprak kaynaklı ısı pompası ile doğalgaz sistemi karşılaştırılmış ve tekno-ekonomik analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile de bu sistemlerin yaygın kullanımı sağlamak için devlet tarafından sağlanması gereken optimum teşvik miktarları belirlenmiştir. Mevcut duruma göre yaklaşık %65 oranında teşvik gerektiği öngörülse de Avrupa bölgesindeki doğalgaz birim fiyat artışları göz önüne alındığında bu oran %36,8'e kadar düşmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri, Doğalgaz, Maliyet analizi, Soğuk iklimler, Yaşam döngüsü maliyeti

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: akapicioglu@cumhuriyet.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Kapıcıoğlu, A. (2023). Alan ısıtma uygulamalarında toprak kaynaklı ısı pompasının doğalgaz sistemine alternatif olarak değerlendirilebilmesi için optimum teşvik miktarının belirlenmesi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 161-176.

## Determining the optimum amount of incentive for using a ground source heat pump as an alternative to the natural gas system in space heating applications

**ABSTRACT:** Turkey is one of the rare countries that have different climatic zones. In addition to the frigid regions, there are also regions with a temperate climate. This diversity also limits the use of a uniform method in conditioning applications. While conventional electric heaters are often sufficient for heating applications in the provinces located in the south, natural gas is used extensively in other regions. On the other hand, ground-source heat pumps have started to be used as alternative conditioning systems worldwide. However, the initial setup costs of these systems limit their use considerably. However, the problems experienced in energy supply in recent years, especially in the natural gas supply in the European region, have reached severe dimensions. In this context, in this study, ground source heat pumps and natural gas systems were compared, and techno-economic analyzes were carried out in heating applications. With the results obtained, the optimum amount of incentives to be provided by the state to ensure the widespread use of these systems has been determined. Although it is foreseen that approximately 65% incentives are required according to the current situation, this rate drops to 36.8% when the natural gas unit price increases in the European region are taken into account.

**Keywords:** Ground source heat pump systems, Natural gas, Cost analysis, Cold climates, Life cycle cost

### 1. GİRİŞ

Dünyadaki nüfus ve ekonomik faaliyetlerde ciddi artışa bağlı olarak enerji talebi her geçen yıl katlanarak artmaktadır. Diğer taraftan bu talebi karşılamak için yenilenemeyen enerjilerin üretim ve tüketimde kullanılması çevre kalitesinin bozulmasını ciddi boyutlara ulaştırmaktadır. Enerji Koruma Ajansı (EPA), her geçen gün artan iklim sorunlarıyla ilişkili olarak emisyon azaltma yöntemlerinin önemine vurgu yapmaktadır (Environmental Protection Agency (EPA), 2022). Bu kapsamda sürdürülebilirlik ve gelecek nesiller için çeşitli tehditler oluşturan iklim değişikliği ile ilişkili pratik çözümler ele alınmalıdır. Yenilenebilir enerjiler çevre sorunlarıyla mücadelede önemli bir yer tutmakta ve sürdürülebilir kalkınma içinde kritik bileşen olarak kabul edilmektedir (Yang ve ark., 2022). Enerji tüketiminin yoğun olarak yaşandığı bireysel ya da toplu konutlarda yenilenebilir enerji kullanarak enerji arzının karbondan arındırılması da bu değişimde kilit rol oynamaktadır.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın 2018 yılı raporuna göre binalar ve inşaat sektörü küresel enerji tüketiminde %36'lık bir pay alarak en yüksek enerji tüketimini gerçekleştirmiş ve enerji ile ilgili tüm emisyonların neredeyse %40'ından sorumlu olmuştur (International Energy Agency (IEA), 2019). Alan ısıtma uygulamaları da buradaki en yüksek enerji tüketimlerinden birini oluşturmaktadır. Diğer taraftan küresel ölçekte alan ısıtmada kullanılan enerji miktarında 2010-2018 yılında %20 azalma gözlemlenmiştir (International Energy Agency (IEA), 2019). Bu azalışta yenilenebilir enerjinin yeri şüphesiz ki oldukça büyüktür. Ayrıca 2010-2018 yılları arasında yenilenebilir enerji kullanımı %21 artışla binalar için en hızlı büyüyen enerji kaynağı haline gelmiştir (International Energy Agency (IEA), 2019). Fakat G7 ülkelerinde artan ekonomik belirsizlik yenilenebilir enerjinin ilerlemesinde ciddi bozulmalara neden olabilir (Su ve ark., 2022). Bu nedenle, ilgili hükümetler, ekonomik istikrarın korunması ve yenilenebilir enerjiyi geçişin ilerlemesi için gerekli politika desteğini sağlamada sorumlu roller üstlenmelidir. Bu kapsamda Türkiye, enerji güvenliğini artırmak ve sürdürülebilir kalkınmayı geliştirmek için yenilenebilir enerji yatırımlarını artırmaya odaklanmaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).

Türkiye'de konutların ısıtılmasında yaygın olarak doğalgaz sistemleri (DG-S) kullanılmakta ve konutlardaki toplam enerji talebinin %80'ini oluşturmaktadır. Diğer taraftan DG-S yerine ısı pompalarının kullanılması konutların ısı enerjisi tüketimini düşürmede oldukça etkili bir yöntemdir. Küresel bazda 2019 yılında, ısı pompalarının kullanıldığı birincil enerji tüketimindeki tasarruf, gaz yoğunluğuna kazan sistemlerine kıyasla 84,1 TWh'ye ulaşmıştır (European Heat Pump Association (EHPA), 2021). Isı pompaları kendi aralarında kaynak türüne göre hava, su (yeraltı veya yüzey suyu), toprak kaynaklı gibi alt dallara ayrılmaktadır (Kavanaugh ve Rafferty, 2014). Isı pompalarının alt türlerinden olan toprak kaynaklı ısı pompası (TKIP) sistemleri, sıradan ısı pompalarına kıyasla daha yüksek enerji verimlilikleri nedeniyle binaların ısıtma ve soğutma uygulamalarında ciddi avantajlar sağlamaktadır (Esen ve ark., 2007; Hepbasli ve Kalinci, 2009). Bu avantaj, hava kaynaklı ısı pompalarından (HKIP) farklı olarak TKIP sistemlerinin toprağı bir ısı kaynağı olarak kullanması sayesinde gerçekleşir (Esen, Inalli, Esen ve ark., 2007; Hepbasli ve ark., 2003; Kapıcıoğlu, 2022). Ayrıca soğuk iklimleri nedeniyle ısınmanın baskın olduğu bölgelerde hava kaynaklı ısı pompalarının ciddi performans düşüşü yaşadığı veya kullanımının sınırlandırıldığı da bilinen bir olgudur (Bertsch ve Groll, 2008; Guoyuan ve ark., 2003; You ve ark., 2016). Bu nedenle ısı pompası pazarında her geçen gün TKIP kullanımını artmakta ve 2020 yılı verilerine göre Avrupa'nın soğuk iklim kuşağında bulunan ülkelerde yurt içi ısı pompası pazarındaki payı %43'e kadar çıkmaktadır (EurObserv'ER, 2022).

TKIP sistemlerinin kullanımı genel olarak yüksek başlangıç maliyetleri nedeniyle sınırlanmakta (Nguyen ve ark., 2014) ve elektrik enerjisi kullanmaları nedeniyle elektrik birim maliyet değişimlerinden fazlaca etkilenmektedir. TKIP'ların farklı iklim ve işletme koşullarında ekonomik değerlendirmesi dünya çapında birçok çalışmaya konu olmuştur (Esen ve ark., 2006; Habibi ve Hakkaki-Fard, 2018; Han ve ark., 2021; Petit ve Meyer, 1998; Zhou ve ark., 2020). Esen ve ark. (Esen ve ark., 2006), TKIP sisteminin birçok alternatif ısıtma sistemine kıyasla ekonomik avantajlar sağladığını bildirmelerine karşın DG-S'ye karşı herhangi bir avantaj sağlamadığını belirtmişlerdir. Kapıcıoğlu ve Esen (Kapıcıoğlu ve Esen, 2022), Türkiye'nin ılıman iklim kuşağında bulunan bir TKIP sisteminin HKIP sistemine kıyasla ekonomik olarak iyi bir alternatif olduğunu bulmuşlardır. Fakat TKIP sistemleri geleneksel sistemlere kıyasla kazı/sondaj (yatay/dikey) ve toprakaltı ısı değiştirgeci (TID) maliyetleri gibi değişkenlerden kaynaklı ciddi bir ilk kurulum maliyeti gerektirmektedir. Lim ve ark. (24), bu durumun TKIP sistemlerinin kullanımında en büyük engel olduğunu belirtilmiştir. Benzer olarak Türkiye'de TKIP kullanımını oldukça sınırlıdır. Bu sınırlamada başlıca etmen ilk kurulum maliyetinin oldukça yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (Kapıcıoğlu ve Esen, 2022). Kullanım sınırlamasındaki bir diğer önemli etmen ise Türkiye'de elektrik birim maliyetinin doğalgaz birim maliyetine kıyasla yüksek olmasıdır. Konu üzerine yapılan çalışmalar bu durum sadece Türkiye için geçerli bir durum olmadığı ortaya konmaktadır. Örneğin Lei ve ark. (Lei ve ark., 2018) Çin'de ofis binalarında kullanılan TKIP sistemlerinin her bölgede önemli ölçüde enerji tasarrufu sağladığını bildirmesine karşın TKIP sistemlerinin yaygınlaşması için bu tür projelerde hükümetin ilk yatırım maliyeti veya elektrik fiyatlarında taviz vermesi gerektiğini belirtmektedir.

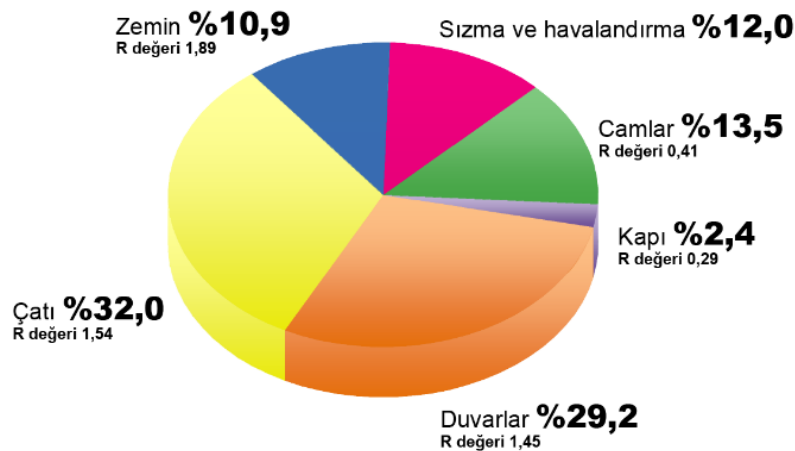
Yukarıda belirtilen literatür taramasının bir sonucu olarak TKIP sistemi gibi yenilenebilir enerji kaynaklı sistemlerin kullanımının yaygınlaşması hükümetler/devletler tarafından teşvik edilmesi ile mümkündür. Fakat burada sorulması gereken asıl soru teşvik miktarının ne olması gerektiğidir. Bu kapsamda yapılan bu çalışmada ısıtma uygulamalarında yaygın olarak kullanılan DG-S ile TKIP sisteminin tekno ekonomik analizleri gerçekleştirilmiş ve TKIP sisteminin alternatif bir sistem olarak ele alınabilmesi için devlet tarafından sağlanması gereken optimum teşvik miktarları hesaplanmıştır. Yazar tarafından bilindiği kadarıyla bu konu üzerine literatürde yapılan herhangi bir

çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle literatüre önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışma kapsamında sadece DG-S'nin karşılaştırmaya alınması Türkiye'de ısıtma uygulamalarında hava kaynaklı ısı pompaları talep görmemesi/kullanılmamasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışma temel olarak iki farklı iklimlendirme sisteminin güç tüketim değerlerinin hesaplanması, bu hesaplamalardan işletme maliyet verilerinin elde edilmesi ve işletme maliyetlerine ilaveten ilk kurulum maliyetlerini de hesaba katarak sistem maliyetlerinin karşılaştırılması ve optimum teşvik miktarlarının belirlenmesini ele almaktadır. Dolayısıyla sistemlerin performans artışının etkisi çalışma kapsamında yer almamaktadır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1 Alanın Isı Kaybı Hesabı

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemi toprak altı ısı değiştirgeçleri hariç tipik bir ısı pompası sistemiyle benzer özellikler taşımaktadır. Fakat ısı kaynağı/ kuyusu olarak toprak altını kullanması diğer ısı pompalarına kıyasla ciddi avantajlar sağlar. Bu avantajın temel nedeni ısıtma sezonunda toprak altı sıcaklığı dış ortam sıcaklığından yüksek, soğutma sezonunda ise düşük olmasıdır. Isıtma sezonunda toprağın termal enerjisi, toprak ısı eşanjöründe dolaşan sıvıya iletilir. Bu enerji daha sonra bir dağıtım sistemi aracılığıyla iklimlendirilecek alana iletmek üzere ısı pompası tarafından çekilir ve güçlendirilir. Sistem yazın tersine çevrilerek ısı pompası yardımıyla toprağa aktarılır. Sistemin genel performansı toprak ısı değiştirgeçleri ile yüksek oranda ilişkilidir. Çalışmaya konu olan TKIP sistemi Türkiye'nin karasal iklim kuşağında bulunan ve kış aylarının çok düşük sıcaklık değerlerine düşebildiği en soğuk illerinden biri olan Sivas ili için analiz edilmiştir. Termodinamik hesaplamalarda ASHRAE verileri referans alınmıştır. Isıtma uygulamasının gerçekleştirileceği alan daha önce ılıman iklim kuşağına göre tekno-ekonomik analizleri gerçekleştirilen (Kapıcıoğlu ve Esen, 2022) 10,1 m x 14,5 m boyutlarında 146.5 m<sup>2</sup> taban alanına sahip bir ofistir. Ofisin tavan yüksekliği 2,74 m olup pencere-duvar oranı yaklaşık %13,4'tür. Ofisin yapısal özelliklerine göre ısı kaybı hesabı HeatCAD paket programı yardımıyla yapılmış ve ofisin toplam ısı kaybı tepe değeri 10,423 kW olarak hesaplanmıştır. Sistemi oluşturan bileşenlerin ısı yükü dağılımları ve ısıl özellikleri Şekil 1'de verilmiştir. Kurulum alanının tasarım sıcaklık değeri ASHRAE 2021 verilerine göre -13,5 °C ve ortalama toprak sıcaklık değeri 11.4 °C'dir (HeatCAD, 2022).



Şekil 1. Bileşen ısı kaybı oranları ve termal direnç değerleri (W/m<sup>2</sup>K)

## 2.2 Toprak ısı değiştirgeci boyutunun belirlenmesi

TKIP sistemlerinin en önemli parametrelerinden biri TID boyutlarının belirlenmesi ve yapılandırılmasıdır. Önceki bölümde belirtilen 10,42 kW'lık ısı kaybı tepe değeri evaporatör gücü olarak alındığında ısı pompası için gerekli TID uzunluğu aşağıda verilen eşitlik ile bulunabilir (Raugeo Sysyem Technology, 2012):

$$L_p = \frac{Q_{eva}}{S_p} \quad (1)$$

Burada  $S_p$  birim boru uzunluğu başına özgöl ısı çıkışıdır (W/m) ve zemin yapısına ve çalışma süresine bağlı olarak değişir. Farklı zemin tiplerine göre bu değerler Tablo 4'te verilmiştir. Sivas ili kahverengi toprak yapısına sahip olması nedeniyle bu toprak yapısının  $S_p$  değeri zayıf ve normal taş zemin arasındadır (İmanverdi Ekberli ve ark., 2005; Orta Anadolu Kalkınma Ajansı, 2011). Sistemin ısı kaybı referans alınarak zayıf ve normal zemin yapısı arasında yer alan bir bölgede 1800 saat/yıl çalışma süresi için yaklaşık 240 m boru gereklidir. Etkileşimi ve maliyeti en aza indirmek için dikey kuyular 4 x 60 m olarak belirlenmiştir. Hesaplanan ısı kaybı değerine göre ihtiyaç duyulan boru boyutları ve yapılandırması VDI 4640'a uygun olarak yapılmıştır.

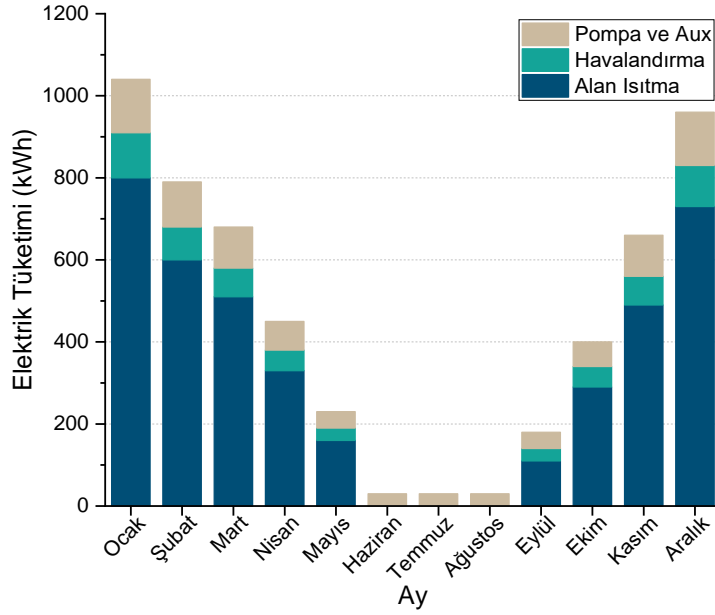
**Tablo 1.** Zemin tipine ve çalışma süresine bağlı olarak özgöl ısı çıkışı değerleri (27)

Zemin yapısı	Özgöl ısı çekme gücü (W/m)	
	1800 saat/yıl	2400 saat/yıl
Zayıf zemin (kuru çökelti, $\lambda < 1,5$ W/mK)	25	20
Normal taş zemin ve suya doymuş çökelti ( $\lambda < 3,0$ W/mK)	60	50
Yüksek ısıl iletkenliğe sahip sert taş ( $\lambda > 3,0$ W/mK)	84	70

## 2.3 Sistemlerin tüketim değerlerinin hesaplanması

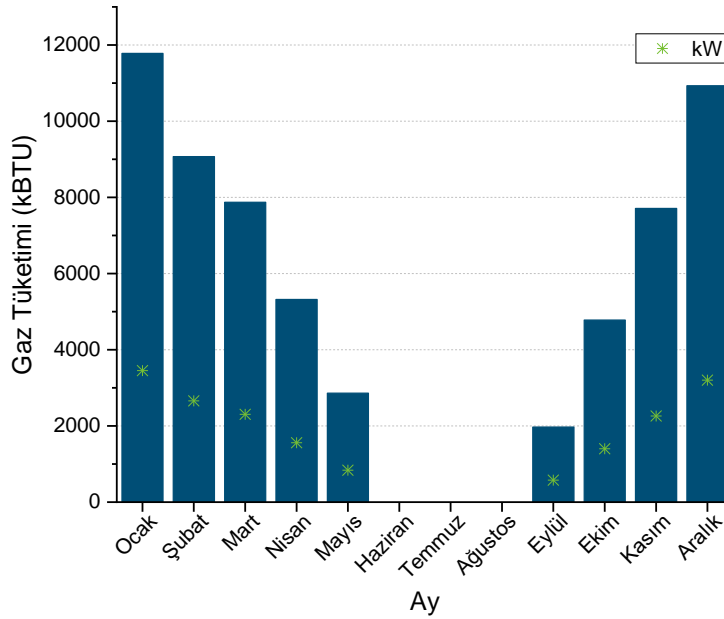
Sistemlerin işletme maliyetlerinin belirlenmesi için öncelikle tüketim değerlerinin belirlenmesi gerekir. Her bir sistemin yıllık güç tüketim değerleri eQUEST 3.65 paket programı yardımıyla simüle edilmiştir. eQUEST programı iklimlendirme sistemlerinin enerji ihtiyaçı hesaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang ve ark., 2015; Xing ve ark., 2015a, 2015b) ve sistem güç tüketim değerlerinin güvenilir bir şekilde hesaplanmasına yardımcı olmaktadır (Shen ve Lukes, 2015). Simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar; iklim verileri, alanın yapısal bileşenleri, çalışma (işletme) saatleri ve iç ortam sıcaklık tasarım değerleri gibi temel parametreler ile doğrudan ilişkilidir. Karşılaştırmaya dahil edilen iklimlendirme sisteminden bağımsız olarak bu parametreler simülasyonlarda kullanılmaktadır. Diğer taraftan sistemin ısı kaybı değerleri HeatCAD programı ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır (fark  $< \%3$ ). TKIP sisteminin yıllık güç tüketim değeri toplam 5480 kW olarak hesaplanmıştır. Bu değere 1460 kW'lık havalandırma, sirkülasyon pompasının ve diğer bileşenlerin (aux) harcadığı güç değerleri dahildir. şekil 2'de TKIP ve sistem bileşenlerinin aylık güç tüketim değerleri verilmiştir. Sistemin aylık bazda en fazla enerji tüketim miktarı ocak ayında gerçekleşmiştir (1040 kW). Yaz ve kış aylarında eşit olmayan zemin yükleri nedeniyle ısı pompasına giren akışkanın sıcaklığında kademeli olarak düşüş söz konusu olsa da bu oldukça sınırlıdır ve hesaplamalarda bu oran %1'in altındadır. Fakat burada dikkat edilmesi gereken husus yaz aylarında toprak altının şarj edilmesidir. Diğer bir ifade ile kış aylarında topraktan çekilen enerji yaz aylarında yerine konmalıdır. Bu nedenle yaz aylarında ısı pompası bypass edilerek doğaal soğutmanın

gerçekleştirilmesi planlanmış ve toprağın altına şarj edilmesi sağlanmıştır. Burada sirkülasyon pompasının harcadığı güçte hesaplamalara dahil edilmiştir.



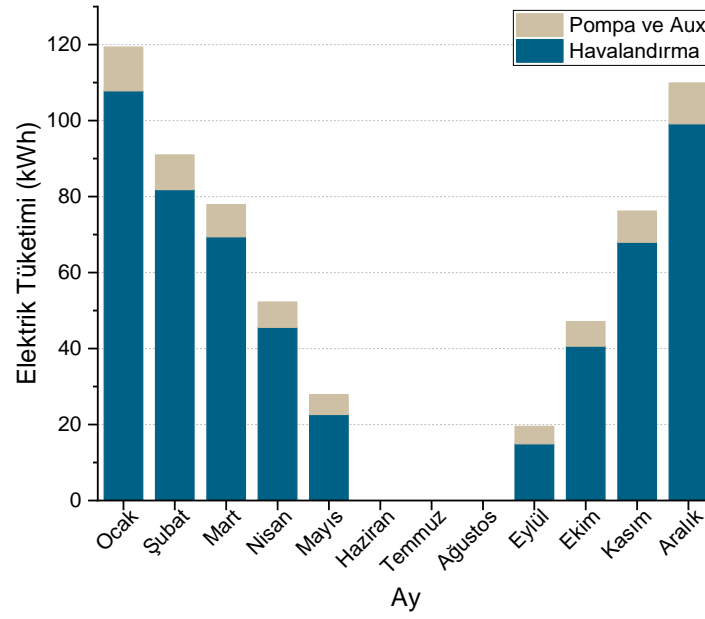
Şekil 2. TKIP sisteminin yıllık elektrik enerjisi tüketiminin aylık değişimi

DG-S'nin toplam doğalgaz enerji tüketimi 65630 kBTU (19235 kW) olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan sistem dolaşım pompasının ve havalandırma sisteminin harcadığı toplam elektrik enerjisi miktarı 657.9 kW olarak bulunmuştur. Şekil 3'te aylık doğalgaz enerji tüketim miktarları ile Şekil 4'te sistemin harcadığı elektrik enerjisi miktarları verilmiştir. Verilen şekillerden DG-S kullanıldığında sistemin harcadığı enerji miktarının yaklaşık dört kat arttığı görülebilir (3571.8 kW).



Şekil 3. Doğalgaz sisteminin yıllık gaz tüketimi değerlerinin aylık değişimi





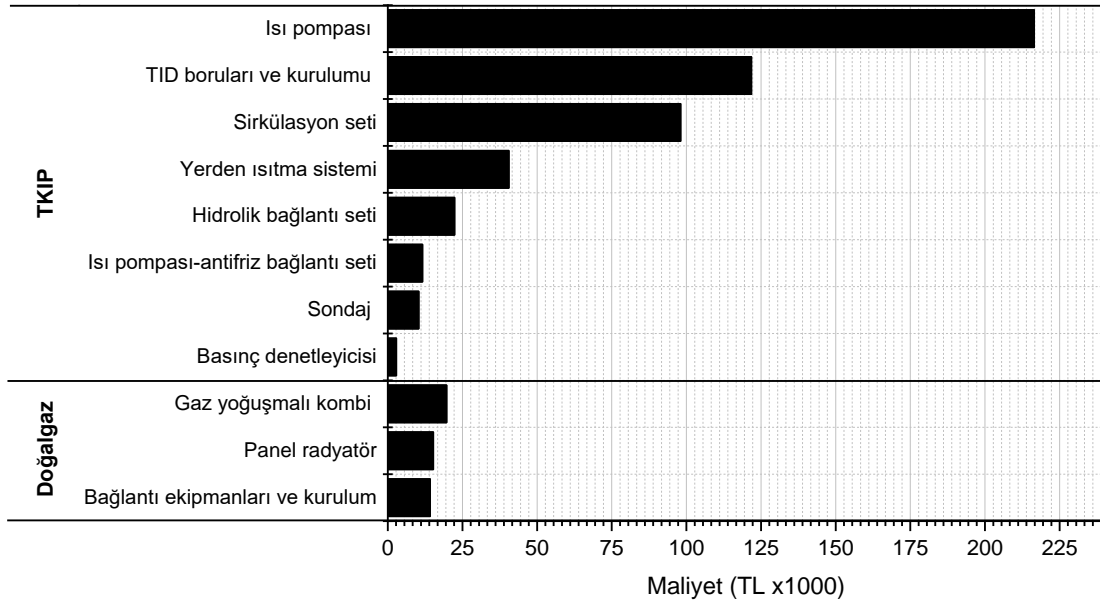
Şekil 4. Doğalgaz sisteminin yıllık elektrik enerji tüketimi değerlerinin aylık değişimi

Bahsi geçen her iki sistemin simülasyon sonuçları sistemlerin işletme maliyetlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. TKIP sisteminin enerji maliyeti, işletme süresi boyunca elektrik maliyetini içerir. Ayrıca, DG-S için enerji maliyeti, işletme süresi boyunca tüketilen doğal gazın maliyetini ve sistemin harcadığı elektrik enerjisi maliyetini içermektedir.

#### 2.4 Sistemlerin İlk Kurulum Maliyetlerinin Belirlenmesi

Bilindiği üzere ısıtma sisteminin nominal gücünün belirlenmesinde ısı kaybı referans alınmaktadır. Daha önceki bölümlerde ısı kaybı tepe değeri 10.42 kW olarak belirtilmişti. Bu ısı yükünü sağlayan ısı pompasının ve DG-S'nin bileşen maliyetleri Şekil 5'te verilmiştir. Seçilen ısı pompasının nominal ısıtma kapasitesi 17.2 kW olup Türkiye şebeke gerilimi ile uyumludur. Isı pompası bileşen fiyatları REHAU ve Özbek Mühendislik firmalarından alınmıştır (Özbek Mühendislik, 2022; REHAU, 2021). Isı pompasının EN 14511'e göre COP değeri 4.52'dir. Soğutucu akışkan olarak R410A kullanılmaktadır (Viessmann, 2019). TKIP sistemi ile ilgili olarak alınan fiyatlar çoğunlukla yabancı para birimi cinsindedir. Yabancı para birimi Türk lirası dönüşümlerinde T.C. Merkez Bankası güncel dönüşüm kurları referans alınmıştır. Alınan fiyatlara şirketlerin uyguladığı iskontolar dahil edilmiştir. Isı pompaları 20 yıldan fazla kullanım ömrüne sahip olmasına karşın (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2018) bu sürenin sağlanmasında bakımların yapılması önemli bir yer tutar. Bu nedenle maliyet kalemlerine bu bakımlar da dahil edilmiştir. TKIP sistemi için bakım maliyeti 1385 TL olarak alınmıştır (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2018). Tüm sistemler için de yıllık bakım maliyeti artış oranı enflasyon oranına eşitlenmiştir. Çalışmada karşılaştırmaya dahil edilen DG-S kombisinin ısıtmada anma gücü 18 kW'tır. DG-S kombisi 813/2013 sayılı Avrupa Birliği düzenlemelerinin gerekliliklerini karşılamakta olup A sınıfı enerji verimliliğine sahiptir (Viessmann, 2021). DG-S'nin ısıtma mevsimi boyunca ortalama verimi 0,8 olarak alınmıştır. Diğer taraftan DG-S'ler TKIP sistemlerinden farklı olarak periyodik bakıma ihtiyaç duyar. Periyodik bakım maliyetleri, sistemlerin ana bileşenlerinin değiştirilmesi için yapılan masrafları temsil eder. Doğalgaz sisteminin tipik ömrü 10 yıl olarak kabul edilmektedir (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2018). Ayrıca, Doğal gaz sistemi için bakım maliyetleri 1665 TL olarak alınmıştır (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2018). Şekil 5'te belirtilen

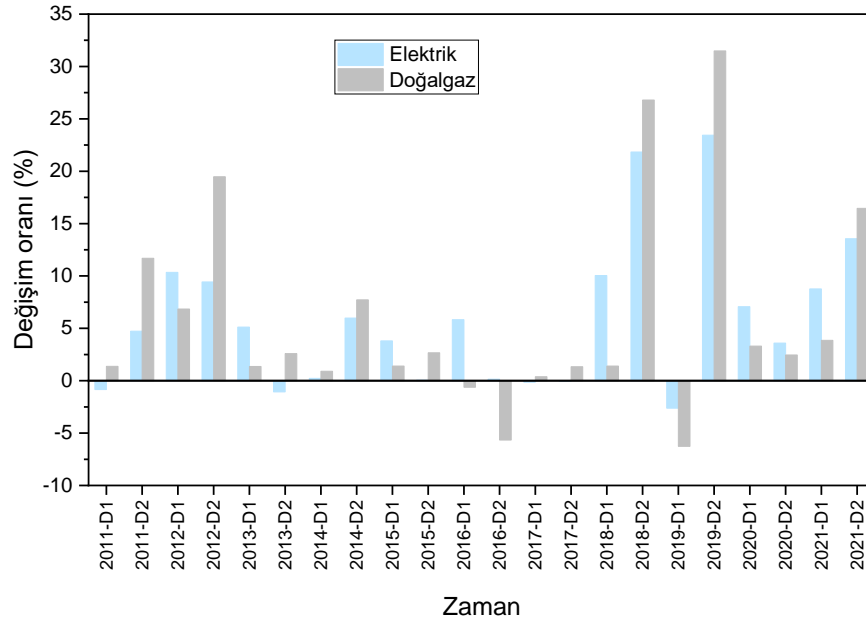
doğalgaz sistemi bileşen maliyetleri yerel firmalardan ve ilgili şirketlerin güncel fiyat tablolarından alınmıştır (Bck Doğalgaz, 2021).



Şekil 5. TKIP ve doğalgaz sistemi bileşen maliyetleri

## 2.5 Birim Maliyetlerin Belirlenmesi

Uzun dönem işletme maliyetlerinin belirlenmesinde en kritik bileşenlerden birisi tüketim kalemlerinin yıllık artış miktarlarının tahmin edilmesidir. Bu çalışmada gelecek elektrik fiyat artış oranı 2023-2025 yılları arasında beklenen enflasyon oranları referans alınarak %24,53 olarak belirlenmiştir (Statista, 2022). Bu değer en son yayınlanan tahminleri içermektedir. Eurostat verilerinden elde edilen Türkiye için elektrik ve doğalgaz yıllık birim fiyat değişim oranları Şekil 6'da verilmiştir (Eurostat, 2022a, 2022b). 2011-2021 yılları arasında doğalgaz maliyeti elektrik maliyetinden TL cinsinden yıllık %0,08 oranında daha fazla artmıştır. Avrupa bölgesi için ise aynı dönemdeki doğalgaz maliyeti artış oranı %0,88 olarak gerçekleşmiştir (Eurostat, 2022a, 2022b). Belirlenen enflasyon değerine bu artış değeri fark olarak yansıtılmıştır. İlk yıl için elektrik ve doğalgaz fiyatları tüm vergiler ve harçlar dahil olmak üzere sırasıyla 1,2808 TL/kWh ve 0,2915 TL/kWh olarak alınmıştır. Bu değerler 2022 yılı ilk altı aylık elektrik fiyatını temsil etmektedir (Eurostat, 2022a, 2022b). Yıllık efektif iskonto oranı (d) Merkez Bankası'nın 2021 yılı için yayınlamış olduğu tablolardan %15,75 olarak alınmıştır (TCMB, 2022).



Şekil 6. Türkiye’de elektrik ve doğalgaz birim maliyetlerinin yıllık değişim oranları

## 2.6 Ekonomik Analiz

Sistemlerin ısı verimleri her ne kadar önemli bir parametre olsa da sistem maliyetleri seçim sürecinde önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Ekonomik olarak sistemleri karşılaştırmak için toplam sahip olma maliyetlerinin (yaşam döngüsü maliyeti) (TSM) bilinmesi gerekir. TSM, sistem için yapılan ilk harcama ile sistemin çalışmasını sürdürmek için devam eden maliyetleri hesaba katmaktadır. Kısaca TSM, başlangıç ( $I$ ) ve işletme maliyetlerinin ( $O$ ) toplamı olarak ifade edilebilir ve aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanabilir:

$$TSM = I + \sum_{i=1}^n O_i \frac{1}{(1+d)^i} \quad (2)$$

Burada;  $d$  iskonto oranı,  $n$  yıl sayısı,  $O_i$  ise  $i$  inci yıldaki işletme maliyetidir. Sistemin işletme maliyetleri, güç tüketim değerlerinin ve enerji birim maliyetlerinin çarpılması ile hesaplanabilir. Bu değerler önceki bölümlerde ayrıntılı olarak verilmiştir. Alternatif sistemler karşılaştırılırken iç karlılık oranı (IRR), iskonto edilmiş geri ödeme süresi (DPP) gibi çeşitli ekonomik göstergeler dikkate alınır. IRR, sistemin tasarım ömrü boyunca nakit akışlarının net bugünkü değerinin toplamının sıfır olduğu faiz oranı olarak tanımlanır. En yüksek IRR'ye sahip seçenek, alternatifleri değerlendirmek için en uygun sistemdir. Bir sistemi diğeriyle değiştirmek için IRR aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir:

$$(I_m - I_a) + \sum_{i=1}^n [O_{i,m} - O_{i,a}] \left( \frac{1}{(1+IRR)^i} \right) = 0 \quad (3)$$

Burada  $m$  ve  $a$  alt indisleri sırasıyla mevcut ve alternatif sistemleri temsil eder. DPP ise bir yatırımın kârının ilk maliyeti kapsadığı süreyi temsil etmektedir. DPP, iskonto edilmiş gelecekteki nakit akışlarını hesaba katarak aşağıda verilen eşitlikle hesaplanabilir:

$$(I_m - I_a) + \sum_{i=1}^{DPP} [O_{i,m} - O_{i,a}] \left( \frac{1}{(1+d)^i} \right) = 0 \quad (4)$$

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

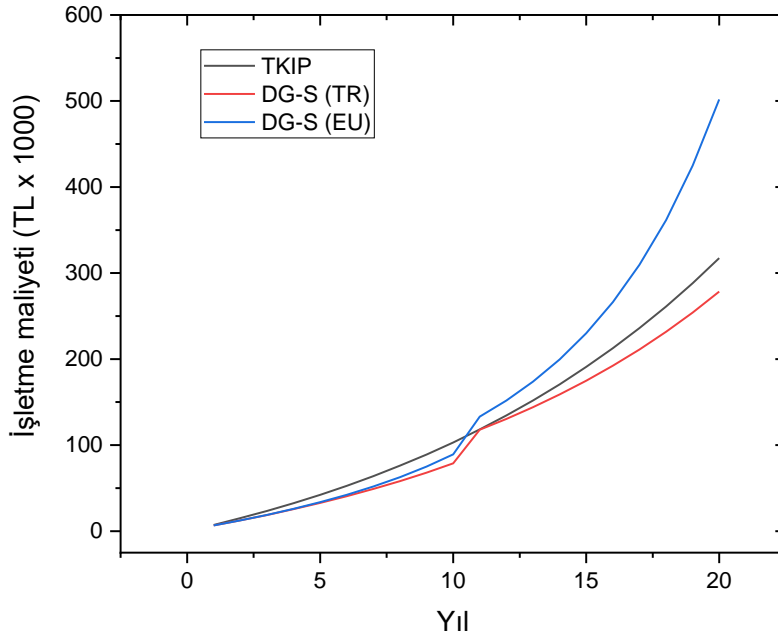
TKIP sistemlerinin DG-S'lere alternatif olarak düşünülebilmesi için son kullanıcı açısından en önemli parametre hiç şüphesiz kurulum ve işletme maliyetleridir. TKIP sistemleri ek bileşen maliyetleri (TID, sirkülasyon pompası gibi) nedeniyle diğer sistemlere kıyasla yüksek ilk kurulum maliyetine sahiptir. Bunun yanında Türkiye'ye TKIP sistem bileşenlerinin ithal yollar ile gelmesi maliyetlerin daha fazla artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla bu etmenler neticesinde ilk kurulum maliyetleri arasında ciddi farklar ortaya çıkmaktadır. Tablo 2'de TKIP ve DG-S'nin TSM değerleri ayrıntılı olarak verilmiştir. Burada verilen DG-S (TR) Türkiye'deki doğalgaz artış oranları referans alınarak belirlenmiş maliyetleri, DG-S (EU) ise Avrupa bölgesindeki artış oranları referans alınarak hesaplanmış maliyetleri içerir. Bu maliyetlerin nasıl belirlendiği önceki bölümlerde detaylı olarak verilmiştir. TKIP ve DG-S arasında güç tüketimi bakımından dört kart fark olmasına karşın (TKIP lehine) işletme maliyetleri bakımından DG-S sistemi daha avantajlıdır. Buradaki avantaj doğalgaz birim maliyetinin daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Fakat küresel olarak doğalgaz birim fiyatlarındaki artış bu avantajı tersine döndürme eğilimindedir. Son yıllarda Avrupa bölgesinde yaşanan doğalgaz krizi ülkeler bazında çok ciddi fiyat artışlarına neden olmuştur. Türkiye'den farklı olarak Avrupa bölgesinde doğalgaz maliyetleri son on yıllık veriler referans alındığında %0,8 oranında daha fazla artmıştır. Bu durumdan Türkiye'nin de etkilenmesi durumunda ortaya çıkan durum senaryosuna göre hesaplanan DG-S (EU)'nun işletme maliyetleri sistemin tasarım ömrü boyunca iki kattan fazla artmasına neden olmaktadır. Fakat bu durum senaryosuna göre bile hala TSM, TKIP sistemi için oldukça yüksektir. Genel olarak TKIP sisteminin DG-S (TR) sistemine alternatif olarak değerlendirilmesi bu mali veriler altında mümkün değildir. DG-S (EU) için ise TKIP sisteminin tasarım süresi içerisinde alternatif olabilmesi için gerekli olan IRR oranı %9,52'dir. Fakat bu değer mevcut durumlar göz önüne alındığında oldukça zordur.

**Tablo 2.** 20 yıllık tasarım ömrü için sistemlerin genel maliyetleri

Parametre	TKIP	DG-S (TR)	DG-S (EU)
Kurulum Maliyeti (TL)	524331	49269	49269
İşletme Maliyeti (TL)	265066	187964	411395
Periyodik Bakım Maliyeti (TL)	-	27583*	27583*
Bakım Maliyeti (TL)	52305	62879	62879
Toplam TSM (TL)	841702	327695	551126

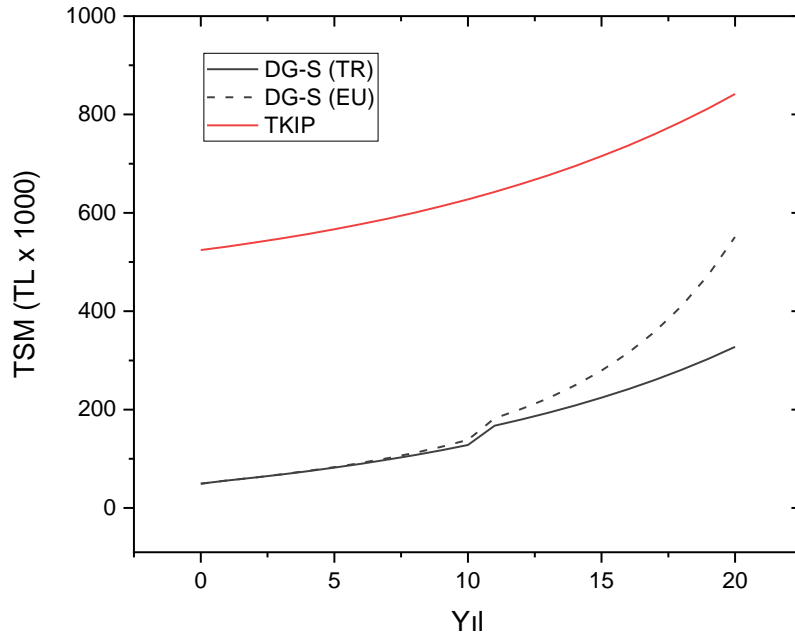
\*%50 periyodik bakım maliyetin 10. yıldaki değeri

Şekil 7'de tasarım ömrü boyunca yıllık işletme maliyetleri verilmiştir. TKIP sistemi ile DG-S (TR) sisteminin maliyetleri 11. yılda eşitlenmesine karşın, birim fiyattaki doğalgaz avantajı sonraki süreçte DG-S (TR) sisteminin tekrar avantajlı duruma geçmesine neden olmuştur. DG-S (EU) sistemi ile TKIP sisteminin maliyetleri ise 10,5 yılda eşitlenmiştir. Fakat burada doğalgaz fiyatındaki artış farkı ilerleyen yıllarda TKIP sisteminin işletme maliyetlerinin daha düşük seviyelerde kalmasına olanak tanımıştır. Diğer taraftan TSM değerlerinin eşitlenmesi 20 yıllık süre zarfında mümkün değildir.



Şekil 7. TKIP ve DG-S'nin işletme maliyetleri

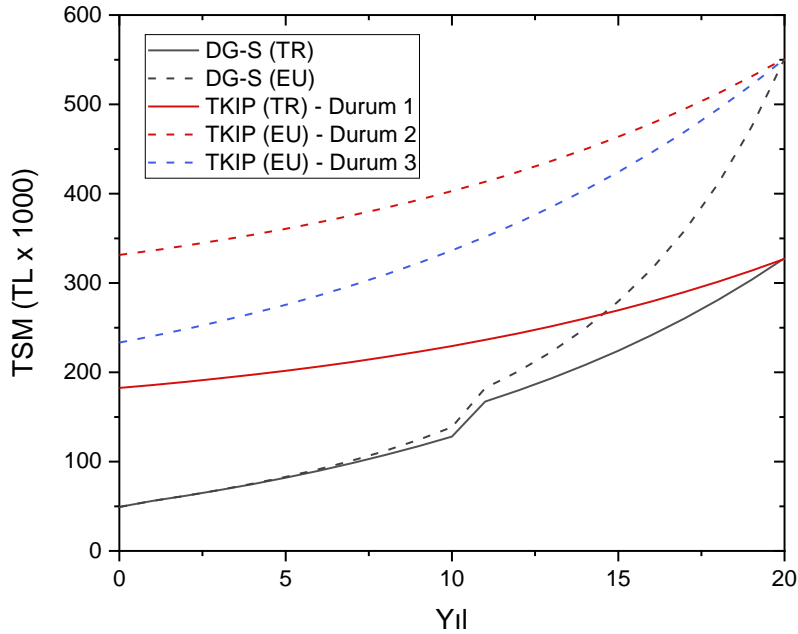
Şekil 8'de TSM değerlerinin yıllık değişimleri verilmiştir. Her ne kadar 11. yıldan sonra TSM değeri DG-S (EU) için ciddi bir artış gösterse de daha önce de değinildiği üzere tasarım ömrü süresince maliyetlerinin eşitlenmesi mümkün değildir. DG-S (EU) ve TKIP sisteminin maliyetlerinin eşitlenme süresi (DPP) 23,3 yıl olarak hesaplanmıştır.



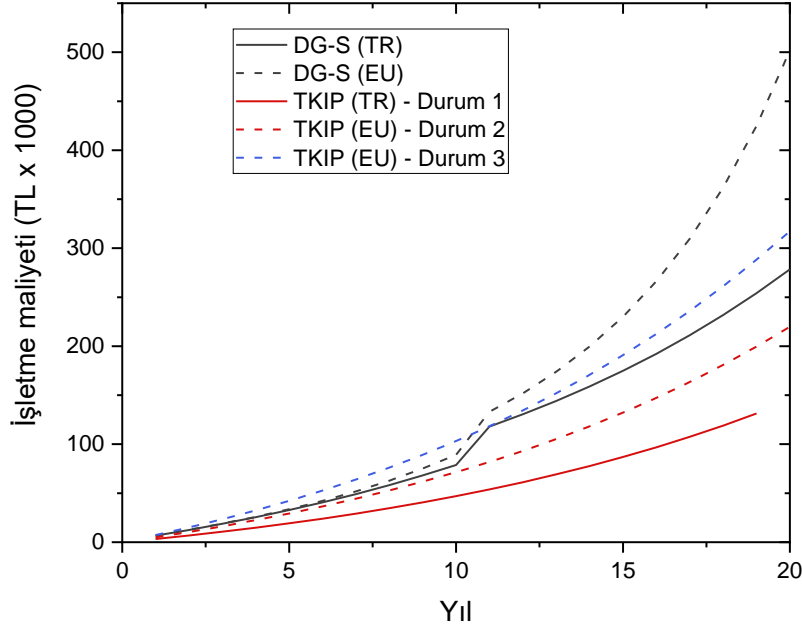
Şekil 8. TSM değerlerinin yıllık değişim değerleri

TKIP sistemi NG-S'ye kıyasla enerji açısından verimli olarak uygulanabilir olsa da yüksek başlangıç maliyetleri, daha geniş çapta benimsenmesini engellemektedir. Diğer taraftan çeşitli Avrupa ülkeleri ve ABD, TKIP sistemlerinin kullanımını desteklemek için çeşitli teşvik politikaları uygulamaktadır (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), 2020; Nordgård-Hansen ve ark., 2022). Buna benzer teşvik politikalarının Türkiye'de uygulanması pek tabii mümkündür. Bu kapsamda TKIP sisteminin DG-S'ye alternatif olarak ele alınabilmesi için öncelikle tasarım ömrü

süresi içerisinde TSM değerlerinin eşitlenmesi gerekir. Şekil 9’da TKIP sisteminin DG-S (TR) ve DG-S (EU)’ya alternatif olabilmesi için gerekli olan optimum teşvik miktarlarına bağlı yıllık TSM değerlerinin değişimi verilmiştir. TKIP sisteminin DG-S (TR) için devlet tarafından yapılması gereken optimum teşvik miktarı %65,2’dir (durum 1). Fakat DG-S işletme maliyetlerinin Avrupa bölgesi ile benzer bir artış göstermesi durumunda bu teşvik oranı %36,8’e düşmektedir (durum 2). Bu değerlerin hesaplanması, ilk kurulum ve elektrik birim maliyeti üzerinden belirtilen oranlarda teşvik miktarlarının uygulanması ile elde edilmiştir. Bakımlar hesaplamalar dahil edilmemiştir. Diğer taraftan elektrik birim maliyetinde hiçbir teşvik uygulamadan sadece bileşen maliyetlerinde bir teşvik uygulanması durumunda mevcut verilerle TKIP sisteminin tamamına yakınının (%98) (bakım ücretleri hariç) devlet tarafından karşılanması gerekmektedir. DG-S (EU) sistemi ele alındığında ise bu oran %55,5 olarak hesaplanmıştır (durum 3). Diğer taraftan bu durum senaryoları referans alınarak hesaplanmış işletme maliyetleri Şekil 10’da verilmiştir. Beklendiği üzere TKIP sisteminin işletme maliyetleri oldukça düşmüştür. Fakat tüm durum senaryolarında elektrik birim maliyeti doğalgaz birim maliyetinden yüksektir. Her ne kadar mevcut durumda elektrik fiyatlarında azalış öngörülmesi de nükleer enerji gibi farklı enerji kaynaklarının işletmeye alınması durumunda elektrik birim maliyetinde gerçekleşebilecek düşüşler ile TKIP sistemlerinin daha cazip hala gelmesine mümkündür. DG-S (TR) için 1. durum senaryosu referans alındığında elektrik birim maliyetine kıyasla doğalgaz birim maliyeti %53.8 daha düşüktür. Bu değer halihazırda nükleer enerjiye sahip ülkelerdeki maliyetlere oldukça yakındır (Biglarian ve ark., 2019). Nükleer enerji kaynaklarının işletmeye alınması halinde sadece kurulum maliyetinde yapılacak teşvikler ile TKIP sistemleri uygulanabilir bir sistem olarak kullanılabilceği öngörülebilir.



Şekil 9. Farklı durum senaryolarına göre TSM değerleri



Şekil 10. Farklı durum senaryolarına göre işletme maliyetlerinin yıllık değişim oranları

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı bir TKIP sisteminin ısıtma uygulamalarında Türkiye’de yaygın olarak kullanılan DG-S’ye göre ekonomik olarak karşılaştırılması ele alınmıştır. Elde edilen veriler ile de DG-S’ye alternatif olarak değerlendirilebilmesi için gerekli optimum teşvik miktarları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen önemli bulgular şu şekilde özetlenebilir.

- TKIP sistemi enerji tasarrufu konusunda DG-S’ye kıyasla 4 kata varan avantaj sağlar. Maliyet olgusu bir kenara bırakıldığında bu durum kaynakların verimli kullanılması açısından oldukça önemlidir.
- Türkiye’de TKIP sistem bileşenlerinin ithal yollardan temin edilmesi nedeniyle ciddi ilk kurulum maliyetine sahiptir. TKIP sisteminin ilk kurulum maliyeti DG-S’ye kıyasla on kattan fazladır.
- Mevcut koşullar altında elektrik birim maliyetinin doğalgaz birim maliyetinden oldukça fazla olması nedeniyle sadece ısıtma uygulamalarında TKIP sistemi DG-S’ye alternatif olarak değerlendirilmemektedir. Bu durum ısı pompaları ve toprakaltı ısı değiştirgeçlerinin yerli üretiminin sağlanması ve teşvik edilmesi ile aşılabılır.
- Yalnızca ısıtma uygulamalarının gerçekleştirildiği bölgelerde TKIP sisteminin alternatif olarak değerlendirilebilmesi için hem elektrik birim fiyatı hem de ilk kurulum maliyetinde devlet tarafından %65,2 teşvik sağlanması gerekmektedir. Fakat halihazırda Avrupa bölgesine kıyasla fiyat artışı sınırlı olan Türkiye’nin, Avrupa’ya eşdeğer şekilde doğalgaz fiyatlarındaki artışa maruz kalması durumunda bu teşvik miktarı %36,8 kadar düşmektedir. Türkiye’nin mevcut konumu göz önüne alındığında benzer artış oranlarının görülmesi mümkündür.
- Sadece bileşen maliyetlerinde teşvik uygulanması durumunda mevcut durum senaryosuna göre ilk kurulum bedelinin tamamına yakınının devlet tarafından sağlanması

gerekmektedir. Fakat Avrupa'daki doğalgaz artış oranları göz önüne alındığında bu oran %55 kadar düşmektedir.

- Halihazırda TKIP sistemlerine birçok ülke benzer teşvikleri uygulamaktadır. Türkiye'de de bu teşviklerin uygulanması mümkün olup TKIP sistemlerinin yaygınlaşmasında önemli katkı sağlayacağı açıktır.

## 5. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## 6. YAZAR KATKISI

Çalışmanın tüm süreçleri yazar tarafından gerçekleştirilmiştir.

## 7. KAYNAKLAR

- Bck Doğalgaz, Mekanik Tesisat, Sivas, 2021.
- Bertsch, S. S., Groll, E. A. Two-stage air-source heat pump for residential heating and cooling applications in northern U.S. climates. *International Journal of Refrigeration*, 31(7), 1282-1292, 2008.
- Biglarian, H., Saidi, M. H., Abbaspour, M., Economic and environmental assessment of a solar-assisted ground source heat pump system in a heating-dominated climate. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(7), 3091-3098, 2019.
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), Eligibility requirements. [https://www.bafa.de/DE/Energie/Heizen\\_mit\\_Erneuerbaren\\_Energien/Foerdervoraussetzungen/foerdervoraussetzungen\\_node.html](https://www.bafa.de/DE/Energie/Heizen_mit_Erneuerbaren_Energien/Foerdervoraussetzungen/foerdervoraussetzungen_node.html), 2020.
- Ekberli, İ., Gülser, Ç., Özdemir N., Toprakların Termo-Fiziksel Özellikleri ve Isısal Yayımlı Katsayısının Değerlendirilmesi. *OMÜ Zir. Fak. Dergisi*, 20(2), 85-91, 2005.
- Environmental Protection Agency (EPA), GHG Reduction Programs Strategies. <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-reduction-programs-strategies>, 2022.
- Esen, H., Inalli, M., Esen, M., A techno-economic comparison of ground-coupled and air-coupled heat pump system for space cooling. *Building and Environment*, 42(5), 1955-1965, 2007.
- Esen, H., Inalli, M., Esen, M., Pihtili, K., Energy and exergy analysis of a ground-coupled heat pump system with two horizontal ground heat exchangers. *Building and Environment*, 42(10), 3606-3615, 2007.
- Esen, H., Inalli, M., Esen, M., Technoeconomic appraisal of a ground source heat pump system for a heating season in eastern Turkey. *Energy Conversion and Management*, 47(9-10), 1281-1297, 2006.
- EurObserv'ER, Heat pumps barometer 2021. <https://www.eurobserv-er.org/heat-pumps-barometer-2021/>, 2022.
- European Heat Pump Association (EHPA), The European Heat Pump Market and Statistics Report. <https://www.ehpa.org/market-data/market-report-2021/>, 2021.
- Eurostat, Electricity prices for household consumers-bi-annual data. *Statistics*. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg\\_pc\\_204/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_204/default/table?lang=en), 2022a.



- Eurostat, Gas prices for household consumers-bi-annual data. Statistics. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG\\_PC\\_202\\_\\_custom\\_3678447/default/?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_PC_202__custom_3678447/default/?lang=en), 2022b.
- Guoyuan, M., Qinhu, C., Yi, J., Experimental investigation of air-source heat pump for cold regions. *International Journal of Refrigeration*, 26(1), 12-18, 2003.
- Habibi, M., Hakkaki-Fard, A., Evaluation and improvement of the thermal performance of different types of horizontal ground heat exchangers based on techno-economic analysis. *Energy Conversion and Management*, 171, 1177-1192, 2018.
- Han, J., Cui, M., Chen, J., Lv, W., Analysis of thermal performance and economy of ground source heat pump system: a case study of the large building. *Geothermics*, 89, 101929, 2021.
- HeatCAD, ASHRAE 2021 Climate Data (22.0.0080), 2022.
- Hepbasli, A., Akdemir, O., Hancioglu, E., Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system. *Energy Conversion and Management*, 44(4), 527-548, 2003.
- Hepbasli, A., Kalinci, Y., A review of heat pump water heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1211-1229, 2009.
- <https://www.eia.gov/analysis/studies/buildings/equipcosts/pdf/full.pdf>, 2018.
- International Energy Agency (IEA), *Global Status Report for Buildings and Construction*, 2019.
- Kapıcioğlu, A., Energy and exergy analysis of a ground source heat pump system with a slinky ground heat exchanger supported by nanofluid. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(2), 1455-1468, 2022.
- Kapıcioğlu, A., Esen, H., Economic and environmental assessment of ground source heat pump system: The case of Turkey. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53(Part B), 2022.
- Kavanaugh, S., Rafferty, K., *Geothermal Heating and Cooling: Design of Ground-Source Heat Pump Systems*. ASHRAE, 2014.
- Lei, Y., Tan, H., Li, Y., Technical-economic evaluation of ground source heat pump for office buildings in China. *Energy Procedia*, 152, 1069-1078, 2018.
- Nguyen, H. V., Law, Y. L. E., Alavy, M., Walsh, P. R., Leong, W. H., Dworkin, S. B., An analysis of the factors affecting hybrid ground-source heat pump installation potential in North America. *Applied Energy*, 125, 28-38, 2014.
- Nordgård-Hansen, E., Kishor, N., Midttømme, K., Risinggård, V. K., Kocbach, J., Case study on optimal design and operation of detached house energy system: Solar, battery, and ground source heat pump. *Applied Energy*, 308, 118370, 2022.
- Orta Anadolu Kalkınma Ajansı, *Sivas Tarım Hayvancılık ve Gıda Sektörel Çalışma Grubu Raporu*, 2011.
- Özbek Mühendislik, <https://www.ozbek.com.tr/>, 2022.
- Petit, P. J., Meyer, J. P., Economic potential of vertical ground-source heat pumps compared to air-source air conditioners in South Africa. *Energy*, 23(2), 137-143, 1998.
- Raugeo Sysyem Technology, *Innovative Heating, Cooling and Storage Using Ground-Source Energy Technical Information 827600/1EN*. [www.rehau.co.uk](http://www.rehau.co.uk), 2012.
- REHAU, <https://www.rehau.com/tr-tr>, 2021.
- Shen, P., Lukes, J. R., Impact of global warming on performance of ground source heat pumps in US climate zones. *Energy Conversion and Management*, 101, 632-643, 2015.
- Statista, *Turkey - Inflation rate 2027*. <https://www.statista.com/statistics/277044/inflation-rate-in-turkey/>, 2022.

- Su, C. W., Khan, K., Umar, M., Chang, T., Renewable energy in prism of technological innovation and economic uncertainty. *Renewable Energy*, 189, 467-478, 2022.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Elektrik Yatırım Rehberi, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-yatirim-destekleri-elektrik-yatirim-rehberi>, 2022.
- TCMB, Reeskont ve Avans Faiz Oranları, <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/TR/TCMB+TR/Main+Menu/Temel+Faaliyetler/Para+Politikasi/Reeskont+ve+Avans+Faiz+Oranlari>, 2022.
- U.S. Energy Information Administration (EIA), Updated Buildings Sector Appliance and Equipment Costs and Efficiency
- Viessmann, VITOCAL brine/water and water/water heat pump technical guide, 2019.
- Viessmann, Vitodens product data, 2021.
- Wang, S., Liu, X., Gates, S., An introduction of new features for conventional and hybrid GSHP simulations in eQUEST 3.7. *Energy and Buildings*, 105, 368-376, 2015.
- Xing, J., Ren, P., Ling, J., Analysis of energy efficiency retrofit scheme for hotel buildings using eQuest software: A case study from Tianjin, China. *Energy and Buildings*, 87, 14-24, 2015a.
- Xing, J., Ren, P., Ling, J., Analysis of energy efficiency retrofit scheme for hotel buildings using eQuest software: A case study from Tianjin, China. *Energy and Buildings*, 87, 14-24, 2015b.
- Yang, L., Zhou, X., Feng, X., Renewable energy led Economic Growth Hypothesis: Evidence from novel panel methods for N-11 economies. *Renewable Energy*, 197, 790-797, 2022.
- You, T., Wu, W., Shi, W., Wang, B., Li, X., An overview of the problems and solutions of soil thermal imbalance of ground-coupled heat pumps in cold regions. *Applied Energy*, 177, 515-536, 2016.
- Zhou, K., Mao, J., Li, Y., Zhang, H., Performance assessment and techno-economic optimization of ground source heat pump for residential heating and cooling: A case study of Nanjing, China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40, 100782, 2020.

Araştırma Makalesi / Research Article

Isıl İşlemin Bakır Kaplı Çelik Boruların Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması

Ozan KOYUNCU<sup>1</sup>, Burak ÇELİK<sup>2</sup>, Yasin AKGÜL<sup>3</sup>, Alper İNCESU<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Bant Boru San. ve Tic. A.Ş., Ar-Ge Departmanı, 41480 Gebze/Kocaeli, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5529-5059>, okoyuncu@bantboru.com

<sup>2</sup> Bant Boru San. ve Tic. A.Ş., Ar-Ge Departmanı, 41480 Gebze/Kocaeli, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4013-5837>, burak\_clk@windowslive.com

<sup>3</sup> K-O Faktör Teknoloji ve Mühendislik, 78050, Karabük, Türkiye/ 3Karabük Üniversitesi, Demir Çelik Enstitüsü, 78050, Karabük, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5643-5968>, yasinakgul@karabuk.edu.tr

<sup>4</sup> K-O Faktör Teknoloji ve Mühendislik, 78050, Karabük, Türkiye/ 3Karabük Üniversitesi, Demir Çelik Enstitüsü, 78050, Karabük, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4404-4331>, alperincesu@karabuk.edu.tr

Geliş/ Received: 22.02.2023;

Kabul / Accepted: 09.04.2023

**ÖZET:** Bakır kaplı çelik borular, özellikle otomobil fren sistemleri olmak üzere birçok ürünün hidrolik sistemlerinin temel bileşenleridir. Otomotiv endüstrisinde kullanılmak üzere üretilen bakır kaplı çelik boruların sahip olmaları gereken mekanik özellikler kabul kriterleri ile belirlenmiştir. Ancak bu mekanik özelliklerin yanı sıra üretim aşamasında havşa açma gibi prosesler için boruların şekillendirilme kabiliyetleri (süneklikleri) de oldukça önemlidir. Bu çalışmada, ısıl işlem ile bakır kaplı çelik boruların süneklik değerlerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, ısıl işlemsiz bakır kaplı çelik borunun ve 6 farklı ısıl işlem parametresi ile elde edilmiş bakır kaplı çelik boruların mikroyapısal ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Optimum tavlama ısıl işlem parametresi ile 450 °C ve 120 dk. 'da 118,7±0,6 HV Vickers sertlik, 315,7±0,6 MPa çekme mukavemeti, 262,7±10,3 MPa akma mukavemeti, 36,9±0,9% kopma uzaması ve 1260 Bar patlatma dayanım değerleri elde edilmiştir. Dolayısıyla, ısıl işlem ile bakır kaplı çelik borunun sırasıyla, sertlik, çekme mukavemeti, akma mukavemeti, patlatma dayanımı değerlerinde yaklaşık %7,05 düşüş, %8,84 düşüş, %6,49 artış, %16,00 düşüş görülürken kopma uzamasında ise yaklaşık %55,04 artış gerçekleştiği elde edilen sonuçlardan görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Bakır kaplı çelik boru, Mekanik özellikler, Mikroyapı, Kırık yüzey, Tavlama.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: alperincesu@karabuk.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Koyuncu, O., Çelik, B., Akgül Y., İncesu, A. (2023). Isıl İşlemin Bakır Kaplı Çelik Boruların Mikroyapısına ve Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 177-192.

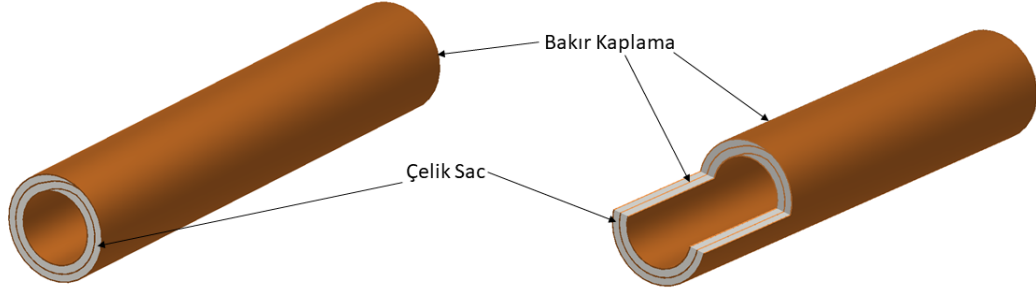
## Investigation of the Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Copper Clad Steel Pipes

**ABSTRACT:** Copper-clad steel pipes are essential components of hydraulic systems for many products, especially automobile brake systems. The mechanical properties of copper-clad steel pipes produced for the use in automotive industry have been determined by acceptance criteria. However, in addition to these mechanical properties, the shaping capabilities (ductility) of the pipes are also very important for processes such as countersink boring during the production phase stage. In this study, it was aimed to improve the ductility values of copper-clad steel pipes by heat treatment. In this context, the microstructural and mechanical properties of copper-clad steel pipes without heat treatment and copper-clad steel pipes obtained with 6 different heat treatment parameters were investigated comparatively. The optimum annealing heat treatment parameter is 450 °C and 120 min. obtained with values as, 118.7±0.6 HV Vickers hardness, 315.7±0.6 MPa tensile strength, 262.7±10.3 MPa yield strength, 36.9±0.9% elongation at break and 1260 Bar bursting strength. Therefore, by this heat treatment, approximately 7.05% decrease, 8.84% decrease, 6.49% increase and 16.00% decrease are observed in the hardness, tensile strength, yield strength, bursting strength values of the copper-clad steel pipe, respectively, the elongation at break is approximately increase as 55.04%.

**Keywords:** Copper clad steel pipe, Mechanical properties, Microstructure, Fracture surface, Annealing.

### 1. GİRİŞ

Bakır kaplı çelik saclar tabakalı metalik kompozit malzeme olarak, kırılma tokluğu, mukavemet, elektriksel iletkenlik, korozyon ve radyasyon direnci arasındaki optimum denge nedeniyle elektrik endüstrileri, otomobil, zırh ve füzyon reaktörü uygulamalarında kullanılan en başarılı lamine metal matris kompozit türleri arasındadır (Liu ve ark., 2018). Çelik saclar bakır kaplamak için elektro kaplama, kimyasal kaplama, difüzyon bağlama, magnetron püskürtme, ark kaynağı, patlatma kaynak, rulo bağlama, vb. gibi birçok farklı kaplama yöntemi kullanılabilir (Ravichandran ve ark., 1996; Kim ve ark., 2004). Otomobil boru endüstrisinde, soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde, dış çapı 4,6 mm ila 10,6 mm arasındaki boruları, üç katmanlı elektro kaplama yöntemi ile üretilmiş bakır kaplı çelik sacların 720° kıvrıldıktan sonra lehimlenerek 1050 °C'ye ısıtıldıktan sonra yavaş soğutulması ile elde edilmektedirler. Cu kaplama kalınlığı yaklaşık 3–5 µm'dir. Cu kaplamanın kalınlığı: Fe substrat oranı yaklaşık 1:100–150:1'dir. Bundy Tube (Bundy, 1932) olarak da bilinen kaynaklı çift cidarlı çelik borular, ayrıca “Bakır Kaplı Çift Cidarlı Çelik Boru” veya “Bakırlı Çift Cidarlı Çelik Boru” olarak da adlandırılmaktadır (Şekil 1). Özellikle otomobil fren sistemleri ve kompresör bileşenleri olmak üzere birçok ürünün hidrolik sistemlerinin temel bileşenidir (Klaková ve ark., 2017). Fren yağının iletim yolu olarak kullanılan fren borusu, bir otomobilin en önemli parçalarından biri olarak kabul edilir ve frenin işlevi üzerinde büyük etkisi vardır (Han ve Park, 2004).



Şekil 1. Bakır Kaplı Çift Cidarlı Çelik Borunun şematik görünümü

Genel olarak, iki metal arasında iyi bir ara yüzey bağlanma özellikleri için metalurjik olarak alaşım elementinin matris içerisinde yüksek katı-katı çözünürlüğü esastır. Bu nedenle, ara yüzey bağlanma durumu, ara yüzey alaşım elementlerinin difüzyon davranışından da doğrudan etkilenmektedir. Kaplama ara yüzündeki alaşım difüzyonu, alaşım elementlerinin atomları arasındaki etkileşime atfedilen bir tür ara yüzey metalurjik bağına aittir (Liu ve ark., 2019). Cu ve Fe'nin birbiri içerisinde düşük çözünürlüğe sahip metaller olduğu göz önünde bulundurulduğunda birleştirme prosedürü, fren boru üretiminde mekanik özellikleri düşürmesi bakımından sorun olarak meydana çıkmaktadır (Liu ve ark., 2018). Bu nedenle, bakır kaplı çelik plakaların ara yüzey bağlanma mukavemetini geliştirmek için faydalı olan, alaşım elementi difüzyonunu ve kaplama ara yüzünde Cu ve Fe'nin kendi aralarında çözünürlüğünü teşvik etmek için makul tavlama işlemi gereklilik olarak görülmektedir. Al-Ghamdi ve Hussein (Al-Ghamdi ve Hussain, 2016) yaptıkları çalışmada tavlama sıcaklığının ve süresinin bakır kaplı çelik sacın bağ kuvveti üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Tavlamanın sacın sünekliğini ve şekillendirilebilirliğini geliştirdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, kaplanmış sac 700°C'nin üzerinde tavlandığında, Cu tabakası ciddi şekilde katmanlara ayrıldığı, bunun da bağ kuvvetinde ciddi bir düşüşe sebep olduğu belirlenmiştir. Lee ve diğerleri (Lee ve ark., 2007) rulo yapıştırma ile elde ettikleri paslanmaz çelik/alüminyum/bakır kaplı metal levhalara tavlama ısıl işlemi uygulamıştır. 300 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bakır katmanında yeniden kristalleşme ve tane büyümesi meydana geldiği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada ise, endüstriyel uygulamalara yönelik olarak nispeten düşük sıcaklıklarda ve farklı sürelerde uygulanan ısıl işlemin bakır kaplı çelik saclardan elde edilmiş otomobil bakır kaplı çelik boruların (fren borularının) mikro yapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Malzemeler ve Boru Üretimi

Çalışmada kullanılan 4,75 mm çapa sahip bakır kaplı çelik borular (fren boruları) Bant Boru A.Ş.'den temin edilmiştir. Bant Boru A.Ş. Tablo 1'de kimyasal bileşimi ve Tablo 2'de mekanik özellikleri verilen sac malzemeyi bakır kaplayarak ve ardından bakır kaplı saca "roll forming" (boru şeklinde şekillendirme) yöntemi uygulayarak fren borularını üretmektedir. Çizelge 1 ve Çizelge 2'deki sonuçlar boru üretiminde kullanılan saclardan deneysel olarak elde edilmiştir. Fren borusu üretiminde çift katlama yapılmakta ve bakırın ergime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklık uygulanarak, çelik yüzeyler arasında bakırın kaynaklanması gerçekleştirilmektedir.

**Çizelge 1.** Fren borusu üretiminde kullanılan DC03 kalite sac malzemenin kimyasal bileşimi (ağ.%)

C	Mn	Si	P	S	N	Al	Cr	Ni	Cu	B	Mo	Fe
0,04	0,23	0,007	0,013	0,014	0,027	0,033	0,03	0,021	0,043	0,001	0,002	Kalan

**Çizelge 2.** Fren borusu üretiminde kullanılan DC03 kalite sac malzemenin mekanik özellikleri

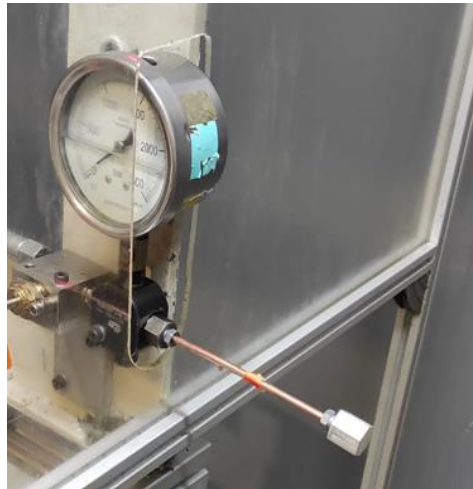
Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV1)
346,3±2,1	192±1	37,4±0,2	102±1

## 2.2. Tavlama Isıl İşlemi

Tavlama ısıl işlemi Protherm 1200 marka ısıl işlem fırınında herhangi bir koruyucu atmosfer kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Numunelerde ani ısınmaya bağlı oluşabilecek iç gerilmeleri önlemek için düşük bir ısıtma hızı (5 °C/dk.) ile numuneler oda sıcaklığından tavlama sıcaklığına kadar ısıtılmışlardır. Ardından belirlenen tavlama sıcaklığında belirlenen sürelerde bekletildikten sonra fırından çıkarılıp havada soğutulmuşlardır. Tavlama ısıl işlemi için 2 farklı sıcaklık (350 °C ve 450 °C) ve 3 farklı süre (30 dk., 60 dk. ve 120 dk.) olmak üzere 6 farklı parametre oluşturulmuştur.

## 2.3. Karakterizasyon Çalışmaları ve Mekanik Deneyler

Borularda tavlama parametrelerine bağlı olarak meydana gelen mikroyapısal farklılıklar, Nikon Eclipse MA200 ters metalürjik optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Ayrıca Enerji Dağılımı Spektroskopisi (EDS) ile SEM görüntüleri üzerinde alansal ve çizgisel elementel analizler gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sonrası elde edilen kırık yüzeyler de SEM analizine tabi tutulmuşlardır. Çekme testleri Zwick/Roell Z600 Üniversal Test Makinesinde 2 mm/dk. test hızında TS EN ISO 6892-1 (ISO 2016) metalik malzemelerde çekme deney standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Boruların kesit alanına uygun olarak uzamanın ölçüldüğü test boyu 20 mm olarak alınmıştır. Vickers mikrosertlik testi, Q10 A+ QNESS mikrosertlik test cihazı ile 1000g yük ve 15 sn bekleme süresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ortalama sertlik değerleri 5 farklı noktadan alınan ölçümlerden hesaplanmıştır. Patlatma testi, ASTM A 254, SAE J 1677 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2) (SAE International, 2004 ve ASTM, 2019).

**Şekil 2.** Patlatma testi için parçanın test düzeneğine bağlanması

Patlatma testi için Enerpac firmasına ait pompanın içerisine DOT 3 hidrolik fren sıvısı doldurulmuş ve testi yapılacak olan parçanın bir ucu kör tapa ile kapatılmıştır. Uygulanan basınç ve patlama anındaki test sonuçları 2500 Bar'lık analog manometre de görüntülenmektedir. Patlatma testi sonrası parçanın görüntüsü Şekil 3'te gösterilmiştir.

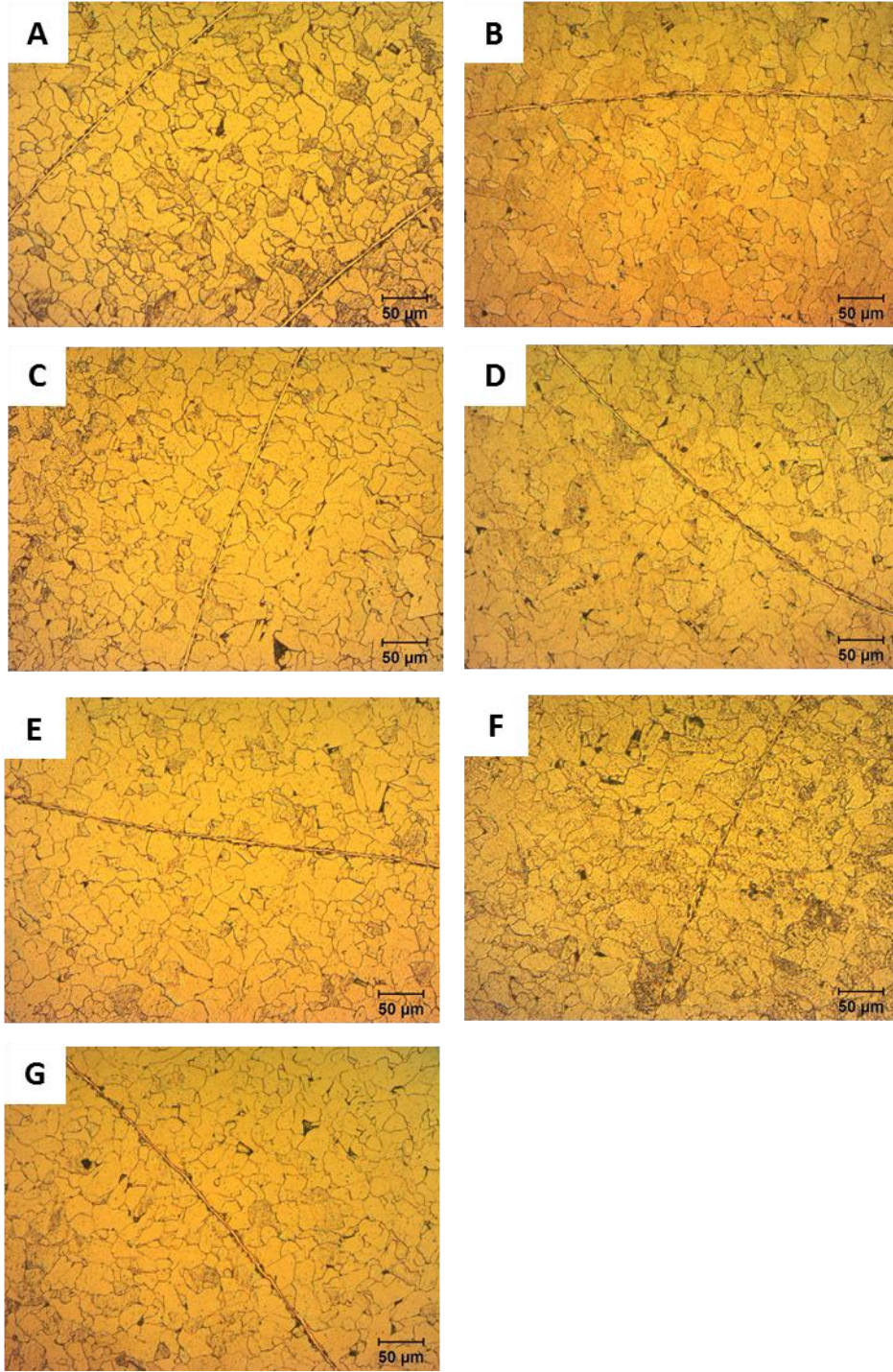


Şekil 3. Patlatma testi sonrası parçanın örnek görüntüsü

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Mikroyapısal Özellikler

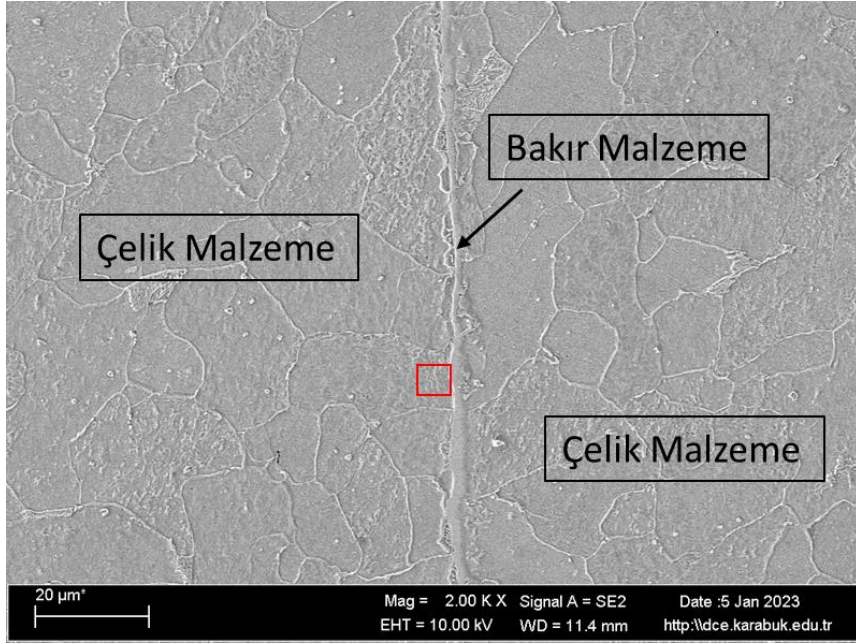
Isıl işlemsiz bakır kaplı çelik borunun ve 6 farklı ısıl işlem parametresi ile elde edilmiş bakır kaplı çelik boru numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 4'te sunulmuştur. Numunelerin çok düşük karbonlu çelik olması sebebiyle perlit fazı oluşumu oldukça düşüktür. Birbirleri ile kıyaslama yapıldığında ise optik mikroskop görüntülerinde numunelerin tane ve faz yapısında belirgin bir değişiklik görülmemiştir. Yapılan tane boyutu ölçüm sonuçlarına göre ısıl işlemsiz borunun ortalama tane boyutu  $14,5 \mu\text{m}$ , sırasıyla 30, 60, 120 dk.  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ısıl işlem görmüş numunelerin ortalama tane boyutu  $22,8 \mu\text{m}$ ,  $23,9 \mu\text{m}$  ve  $19,4 \mu\text{m}$ , sırasıyla 30, 60, 120 dk.  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ısıl işlem görmüş numunelerin ortalama tane boyutları ise  $21,5 \mu\text{m}$ ,  $24,4 \mu\text{m}$  ve  $21,9 \mu\text{m}$ 'dir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde tavlama ısıl işlemi ile birlikte bir miktar tane irileşmesi meydana gelmiş ancak farklı ısıl işlem parametreleri arasında tane boyutu bakımından belirgin bir farklılaşma olmadığı anlaşılmıştır. Çünkü uygulanan ısıl işlem sıcaklıkları ( $350\text{-}450 \text{ }^\circ\text{C}$ ), çeliğin rekristalizasyon tavlama sıcaklığının ( $\sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (Choi ve ark., 2002) ve faz yapısında değişiklik olması için gerekli östenit sıcaklığının altındadır.



**Şekil 4.** A) Isıl işlemsiz numuneye, B-D) sırasıyla 30, 60, 120 dk. 350 °C’de ısıl işlem görmüş numunelere, E-G) sırasıyla 30, 60, 120 dk. 450 °C’de ısıl işlem görmüş numunelere ait optik mikroskop görüntüleri.

Uygulanan ısıl işlemin çelik-bakır ara yüzeyine olan etkisini incelemek için Şekil 5’te örnek olarak verildiği üzere, numunelerin kırmızı kare ile gösterildiği gibi bakır malzeme hattına temas eden çelik bölgelerinden SEM-EDS analizi yapılmıştır.





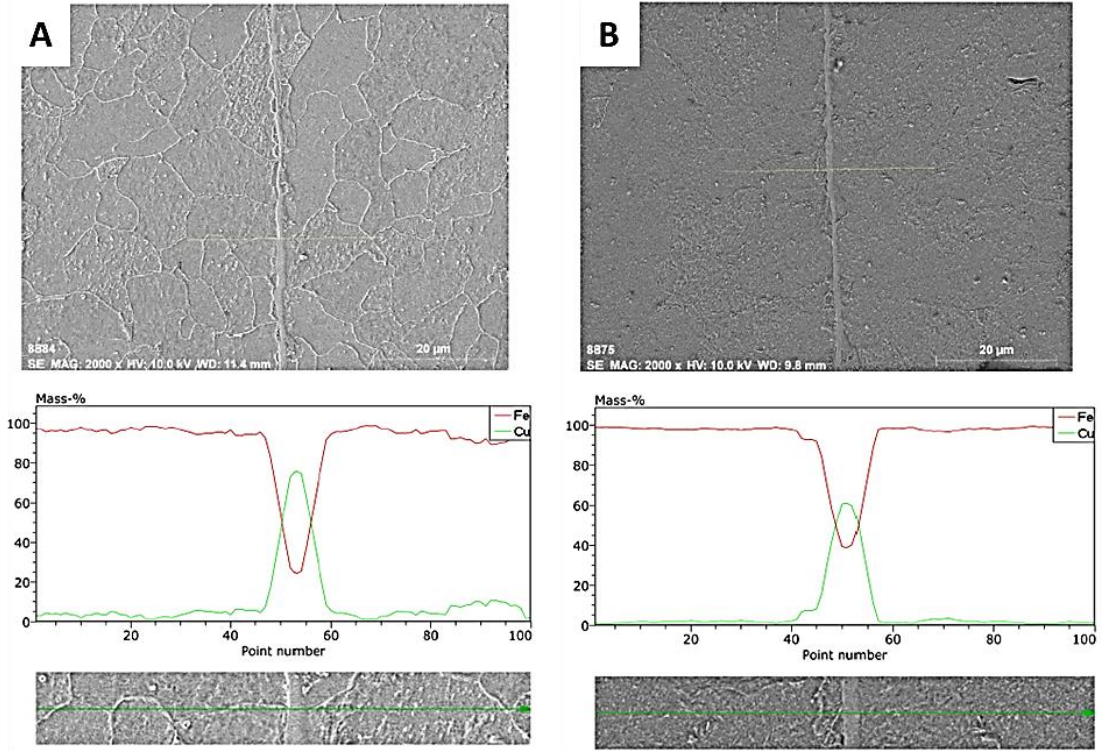
**Şekil 5.** Bakır kaplı çelik boruların mikroyapısı ve SEM-EDS analizi için bakır hattına yakın seçilen örnek bölgenin gösterimi

Çizelge 3'te numunelerin çelik tarafından bakır hattına temas eden bölgelerinden yapılan SEM-EDS bölge analizi sonuçları sunulmuştur. Sonuçlara göre uygulanan ısıl işlem ile beraber bakır hattına temas eden çelik içerisindeki bakır miktarının nispeten artmış olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, ısıl işlemin çelik-bakır ara yüzeyinde bakırdan çelik tarafına doğru atomik kütle transferi etkileşimini arttırdığı şeklinde yorumlanabilmektedir. Sadece ısıl işlem sıcaklığının artışı ile dahi, ara yüzeyin etkileşiminin artmasında daha olumlu etkiye sahip olduğu söylenebilmektedir.

**Çizelge 3.** Numunelerin bakır malzeme hattına yakın bölgelerdeki SEM-EDS bölge analizi sonuçları

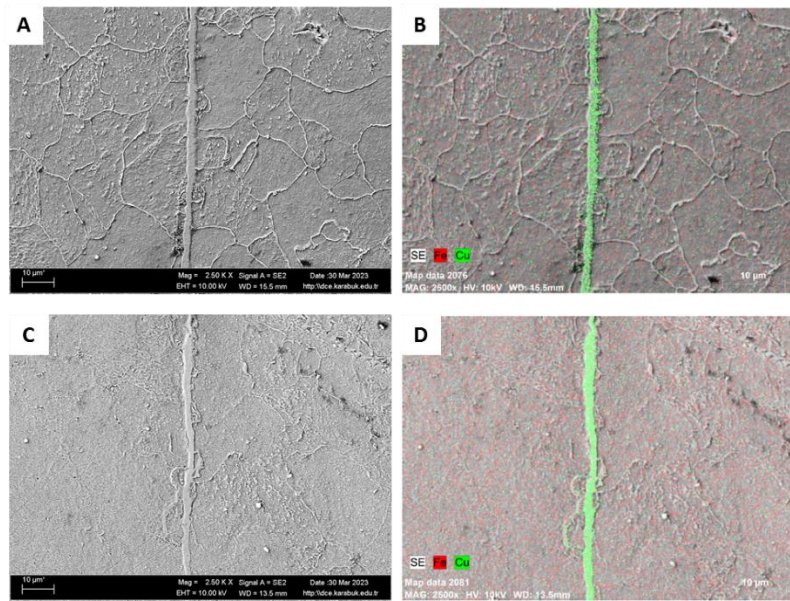
Numune	Bakır Oranı (ağ. %)
Isıl İşlemsiz	1,22
350 °C-60 dk. Isıl işlemlili	3,21
450 °C-60 dk. Isıl işlemlili	6,25

Ara yüzey etkileşimi ayrıca, Şekil 6'da gösterildiği üzere SEM-EDS çizgi analizi ile de incelenmiştir. Çizgi analizi sonucunda ısıl işlem gören numunenin, ısıl işlem görmemiş numuneye kıyasla daha homojen bir geçiş gösterdiği görülmektedir. Bir başka deyişle, çelik-bakır arayüzeyinde, ısıl işlem gören numunenin (Şekil 6B) Fe/Cu oranları, ısıl işlem görmemiş numuneye (Şekil 6A) kıyasla birbirine daha yakındır. Bu sonuç, SEM-EDS bölge analizi sonuçlarını doğrulamaktadır.



Şekil 6. A) ısıt işlemsiz, B) 450 °C-120 dk. ısıt işlem görmüş numunelerin çizgi analiz sonucu

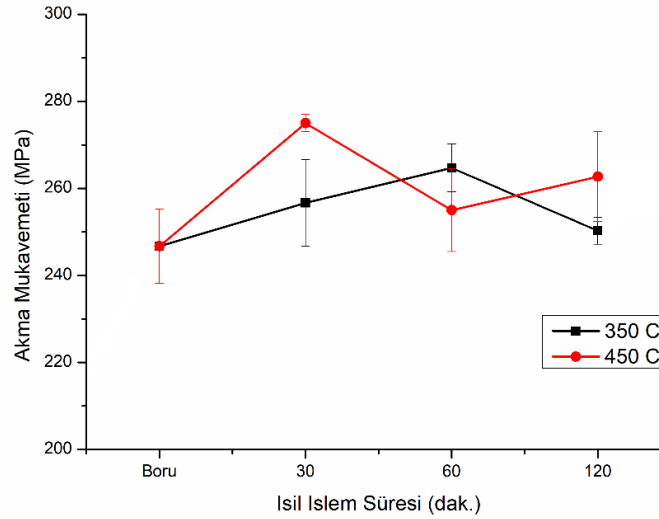
Nitekim, Zhang ve ark. döküm yöntemi ile ürettikleri Fe-Cu bimetal malzemenin Fe/Cu arayüzünde Fe atomlarının, Cu tarafının iç kısmına daha fazla yayılabildiğini, ancak Cu atomlarının, Fe tarafının içine zorlukla dağılabildiğini tespit etmişlerdir (Zhang ve ark., 2020). Uygulanan tavlama ısıt işlemi ile birlikte difüzyon aktivasyonunun artarak çelik içerisindeki Cu miktarının arttığı hem Çizelge 3'teki sonuçlardan hem de Şekil 6'da çizgi EDS görsellerinden anlaşılmaktadır. Ancak bahsedilen difüzyonunun sadece bakır-çelik arayüzünde ve bakır hattının temas ettiği çelik bölgelerinde olduğu Şekil 7'de verilen SEM-Haritalama sonuçlarında görülmektedir. Yani bakırın çeliğin iç bölgelerine kadar difüzyonu söz konusu değildir.



Şekil 7. A-B) ısıt işlemsiz, C-D) 450 °C-120 dk. ısıt işlem görmüş numunelerin sırasıyla mikroyapı ve SEM-Haritalama sonucu

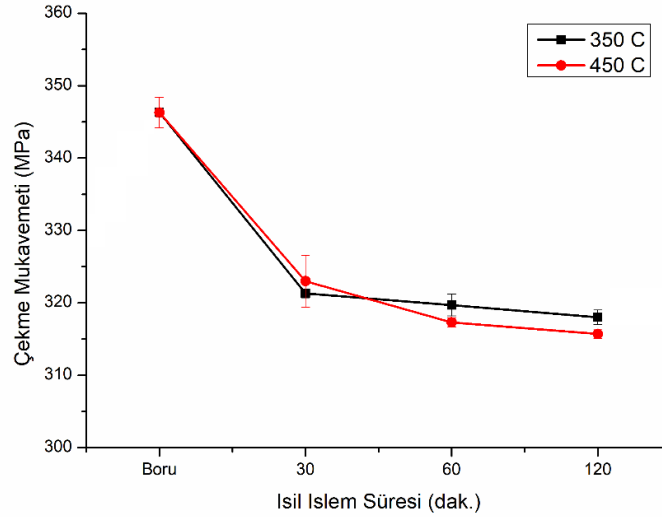
### 3.2.Çekme Testi Sonuçları

Isıl işlemsiz bakır kaplı çelik borunun ve 6 farklı ısıl işlem parametresi ile elde edilmiş bakır kaplı çelik boru numunelerine ait çekme testi sonuçları karşılaştırmalı grafiksel olarak Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. Şekil 8'de ısıl işlemsiz bakır kaplı çelik borunun akma mukavemeti  $246,7 \pm 8,5$  MPa olarak tespit edilmiştir. Uygulanan tavlama ısıl işlem sıcaklık ve süresine bağlı olarak akma mukavemetinde dalgalanmalar olmakla beraber sürekli artış ya da sürekli azalış tarzında bir farklılaşma gözlemlenmemiştir. Bunun sebebi uygulanan ısıl işlem sıcaklıklarının çeliğin yeniden kristalleşme sıcaklıklarının ( $\sim 550$  °C) altında olmasına bağlı olarak çelik sac tabakasında dislokasyon hareketleri engelleyecek nitelikte çekirdeklenmelerinin meydana gelmemiş olmasından kaynaklanmaktadır (Kavarana ve ark., 2000). Her ne kadar uygulanan ısıl işlem sıcaklığı bakırın yeniden kristalleşme sıcaklığının ( $225$  °C) (Benchabane ve ark., 2008) üzerinde olsa da sac çeliğe bakır kaplama işlemi elektro kaplama yöntemiyle yapılmış ve çok ince bir kaplama kalınlığına sahip olmasından dolayı herhangi bir yeniden kristalleşme veya çekirdeklenme mekanizmasına mikroyapısal inceleme sonuçlarında rastlanmamıştır. Nitekim  $450$  °C-30 dk. ve  $350$  °C-60 dk.'da ulaşılan  $260$  MPa'ın üzerindeki akma mukavemeti değerlerinin sebebi tavlama sırasındaki bakır çelik arayüzeyinde meydana gelen difüzyondur. Difüzyonla birlikte gevşek ara yüzeyde atomların artan bağlanma kuvveti, tane sınırının kaymasını önleyen ve uygulanan gerilim altında akmaya karşı daha dirençli hale getirdiği düşünülmektedir (Zhang ve ark. 2020).

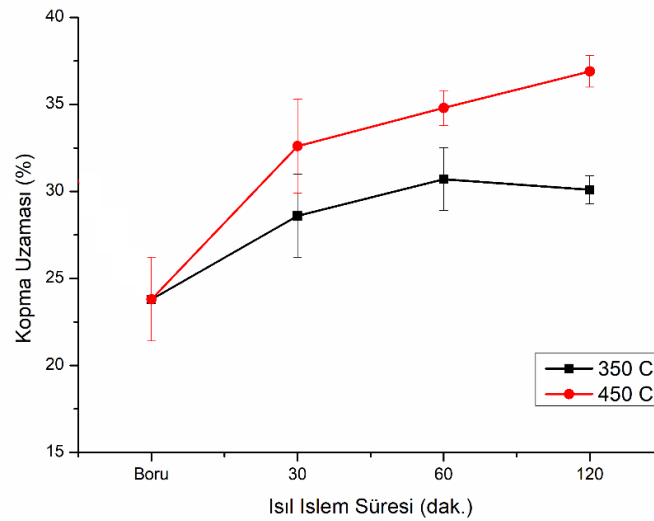


Şekil 8. Akma mukavemetinin tavlama süre ve sıcaklığına bağlı değişimi

Şekil 9'da numunelere ait çekme mukavemeti sonuçlarına göre ısıl işlemsiz bakır kaplı çelik borunun çekme mukavemeti  $346,3 \pm 2,1$  MPa olarak tespit edilmiştir. Uygulanan tavlama ısıl işlemi sıcaklık ve süresine bağlı olarak çekme mukavemeti değerlerinde keskin bir düşüş meydana geldiği gözlemlenmektedir. Ayrıca artan tavlama ısıl işlem süresine bağlı olarak çekme mukavemeti değerlerinin her iki tavlama sıcaklığında da azalan bir eğilimde değişim gösterdiği anlaşılmaktadır. Bunun sebebi azalan dislokasyon yoğunluğu nedeniyle ısıl işlem uygulanmış bakır kaplı çelik borularda tavlama kaynaklı yumuşama (çekme mukavemetinde düşüş) meydana gelmesidir (Gu ve Song, 2019).



Şekil 9. Çekme mukavemetinin tavlama süre ve sıcaklığına bağlı değişimi



Şekil 10. Kopma uzamasının tavlama süre ve sıcaklığına bağlı değişimi

Şekil 10'da numunelere ait kopma uzaması sonuçlarına göre ısıl işlemsiz bakır kaplı çelik borunun kopma uzaması  $23,8 \pm 2,4$  olarak tespit edilmiştir. Borulara uygulanan farklı süre ve sıcaklıktaki tavlama ısıl işlemine bağlı olarak ise artan tavlama süresine bağlı olarak kopma uzamalarında her iki tavlama ısıl işlem sıcaklığında da artış trendi gözlemlenmektedir. 450 °C'de uygulanan tavlama ısıl işlemindeki uzama artışlarının 350 °C'de uygulanan tavlama ısıl işlemindeki uzama artışlarından her ısıl işlem süresi için daha yüksek olduğu belirgin bir şekilde grafikten anlaşılmaktadır. Bunun sebebi uygulanan tavlama ısıl işlemine bağlı olarak kalıntı gerilmelerin ve yüksek yoğunluklu dislokasyonların ortadan kalkmasıdır (Liu ve ark., 2018). Ayrıca artan ısıl işlem süresine bağlı olarak her iki sıcaklık için de standart sapma aralıklarında daralmaların meydana gelmesi borulardaki homojenliğin ve kararlılığın ısıl işlemle birlikte arttığını göstermektedir.

**Çizelge 4.** Numunelerin çekme deneyleri sonucunda elde edilen çekme dayanımı ve akma dayanımı değerleri

Numune	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
Min. Kabul Kriteri	290	200
Isıl İşlemsiz	346,3±2,1	246,7±8,5
350 °C-30 dk.	321,3±0,6	256,7±10,0
350 °C-60 dk.	319,7±1,5	264,7±5,5
350 °C-120 dk.	318,0±1,0	250,3±3,1
450 °C-30 dk.	323,0±3,6	275,0±2,0
450 °C-60 dk.	317,3±0,6	255,0±9,5
450 °C-120 dk.	315,7±0,6	262,7±10,3

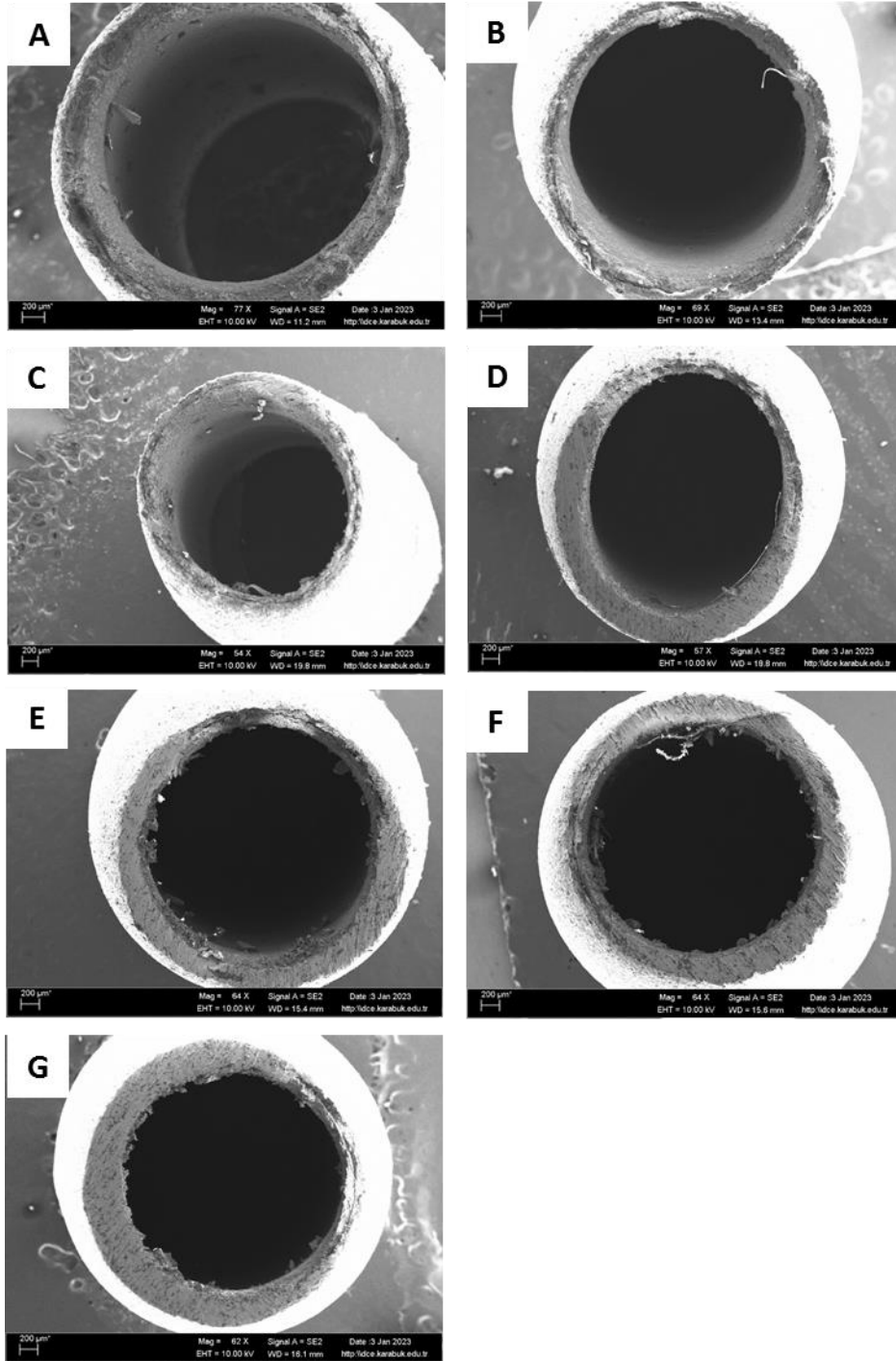
Çizelge 4’te numunelerin ve minimum kabul kriteri için çekme ve akma dayanımı değerleri verilmiştir. Çizelge 4’e göre ısıl işlem ile çekme ve akma dayanımı değerlerinde düşüş olmasına rağmen bakır kaplı çelik boruların min. kabul kriteri değerlerini karşıladıkları görülmektedir.

Şekil 11 ve Şekil 12’de çekme testi sonrası numunelerin kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri sunulmaktadır. Özellikle 450 °C’de daha belirgin olmak üzere, ısıl işlemlenmiş numunelerin daha geniş alanda boşluksuz ve bakır malzemeye ait olmayan kırılma yüzeylerine sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin bakır-çelik arayüzeyindeki difüzyona bağlı olarak iyileşen bakır-çelik arayüzey etkileşimi olduğu düşünülmektedir.

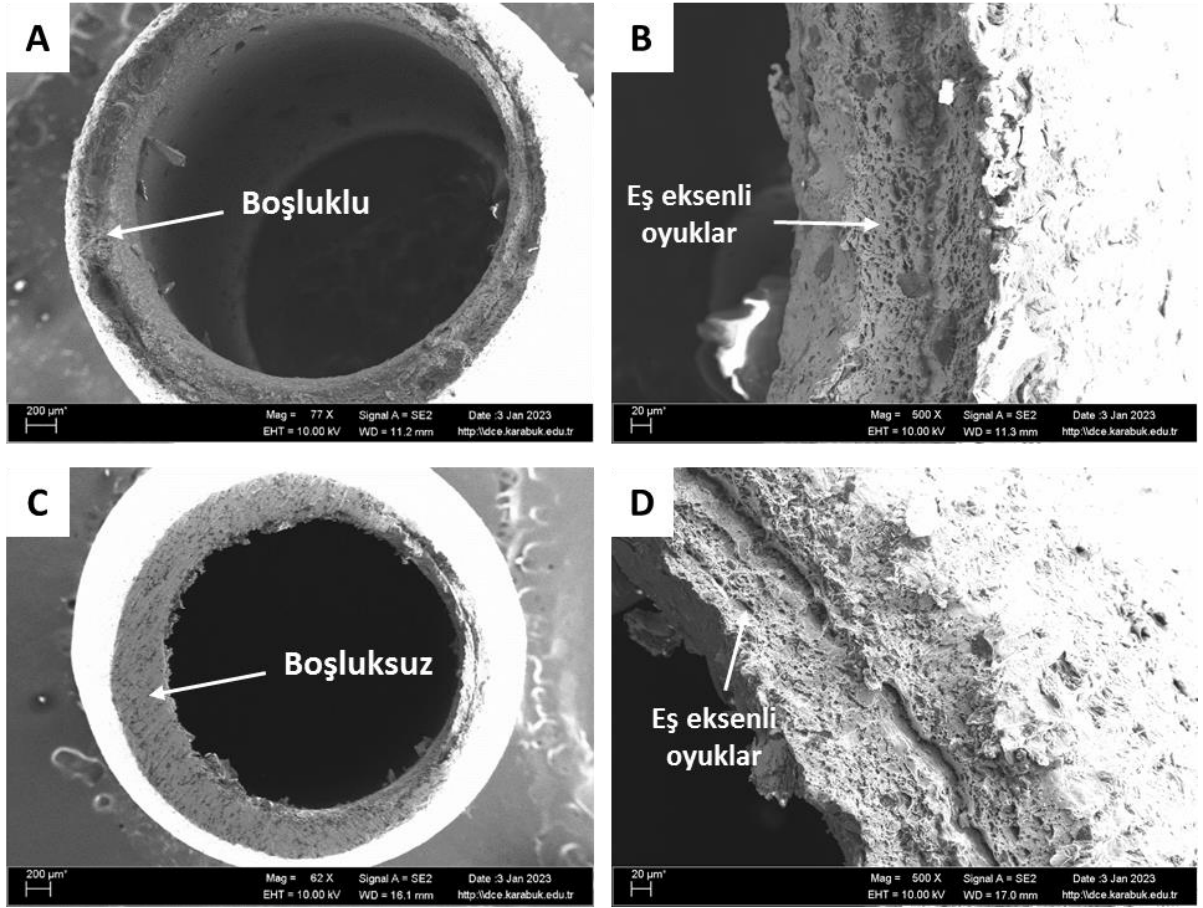
Kırık yüzey incelemelerinde de görüldüğü üzere ısıl işlemde hem sıcaklığın hem de sürenin artışı ayrı ayrı olarak çelik-bakır ara yüzey etkileşimini olumlu yönde etkilediği söylenebilmektedir. Çünkü artan süre ve sıcaklık ile numuneler, daha geniş alanda boşluksuz ve bakır malzemeye ait olmayan kırılma yüzeylerine sahiptirler. Ayrıca hem ısıl işlemlenmiş hem de ısıl işlemsiz numunenin kırık yüzeylerinde eş eksenli oyuklar (dimples) görülmektedir. Bu da numunelerin sünek kırıldığını göstermektedir.

### 3.3.Sertlik Testi Sonuçları

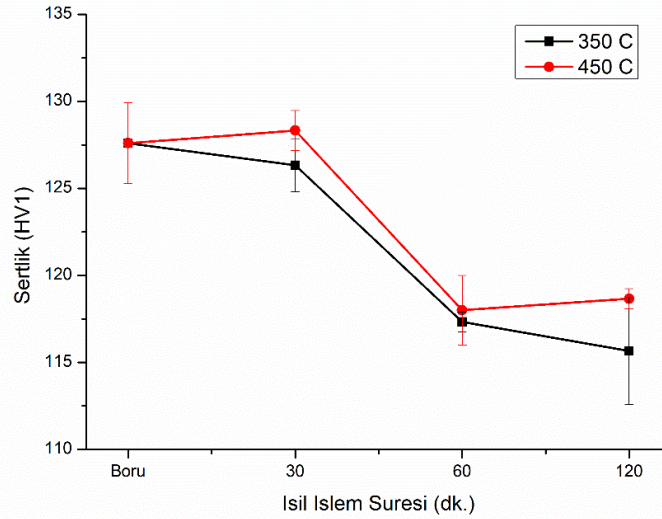
Vickers sertlik testinden elde edilen sonuçlar Şekil 13’te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Isıl işlemsiz fren borusu ile 350 °C’de 30 dk. ve 450 °C’de 30 dk. tavllanmış numuneler karşılaştırıldığında (Şekil 13) standart sapma değerleri de göz önünde bulundurularak belirgin bir farklılığın meydana gelmediği söylenebilmektedir. Tavlama süresi 60 dk.’ya çıktığında ise sertlik değerlerinde yaklaşık %7 oranında belirgin bir düşüşün her iki tavlama sıcaklığı için de meydana geldiği görülmektedir. 60 dk. tavllanmış numuneler ile 120 dk. tavllanmış numuneler karşılaştırıldığında ise yine standart sapmaları ile birlikte değerlendirilecek olunursa belirgin bir farklılık görülmemektedir. Sertlik düşüşü istenilen durumlar için optimum tavlama süresinin her iki tavlama sıcaklığı için de 60 dk. olarak yeterli olduğu anlaşılmaktadır. 450 °C’de elde edilen sertlik değerlerinin tüm tavlama süreleri için 350 °C’de elde edilen sertlik değerlerinden az miktarda da olsa (yaklaşık 2 HV) yüksek olduğu grafikten anlaşılmaktadır. Difüzyona bağlı olarak bakır atomlarının çelik sac plaka içerisine nüfuz ederek çözünmesine bağlı olarak çekme dayanım değerlerindeki değişime de paralel şekilde fren borularının sertliklerinde düşüş meydana geldiği söylenebilmektedir. Nitekim bakır-çelik arayüzeyinde Fe ve Cu elementlerinin birbiri içerisindeki difüzyonu, SEM-EDS analizlerinde (Şekil 5 ve Şekil 6) belirgin şekilde gözlemlenmiştir.



**Şekil 11.** Çekme testi sonrası A) Isıl işlemsiz numuneye, B-D) sırasıyla 30, 60, 120 dk. 350 °C’de ısıl işlem görmüş numunelere, E-G) sırasıyla 30, 60, 120 dk. 450 °C’de ısıl işlem görmüş numunelere ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri



Şekil 12. Çekme testi sonrası A-B) Isıl işlemsiz, C-D) 450 °C-120 dk. ısıl işlem görmüş numunelere ait kırık yüzeylerin SEM görüntüleri



Şekil 13. Mikro sertliğin tavlama süre ve sıcaklığına bağlı değişimi

### 3.4. Patlatma Testi

Numunelerin patlatma testi sonuçları Çizelge 5'te sunulmuştur. Çizelge 5'e göre uygulanan 350 °C'de uygulanan ısıl işlemler ile boruların patlatma dayanımı ortalama yaklaşık %11,6 düşerken, 450 °C'de uygulanan ısıl işlemler ile boruların patlatma dayanımı ortalama yaklaşık %15,3 oranında düştüğü görülmektedir. Boruların patlatma dayanımları ile çekme dayanımları benzer bir eğilim

göstermiş olup, uygulanan sıcaklık ve işlem süresinin artışı ile patlatma dayanımı düşüş göstermiştir. Mishima ve ark., T(°C) sıcaklığındaki borunun patlama basıncı  $P_B$ , borunun bu sıcaklıktaki nihai gerilme mukavemetinden de formül aracılığıyla hesaplanabildiğini belirtmişlerdir (Mishima ve ark., 1966).

$$P_B = \frac{200 \times t \times \sigma_B}{D}$$

Burada D ve t sırasıyla borunun dış çapı (mm) ve duvar kalınlığı (mm) ve  $\sigma_B$  borunun uzunlamasına yöndeki nihai çekme dayanımıdır (kg/cm<sup>2</sup>). Bu formülizasyona göre patlama basıncı ile çekme mukavemetinin doğrudan ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Tavlama ısıl işlemi ile birlikte çekme mukavemetindeki düşüşlerin sebebi ise esas olarak, ferrit dislokasyonlarının yok edilmesinden kaynaklanmaktadır (Li ve ark., 2012).

Fren borusu patlatma testi kabul kriterlerine göre 4,75 mm çapa sahip borunun minimum 1100 Bar basınca dayanması gerekmektedir (SAE International, 2017 ve ASTM, 2019). Dolayısıyla ısıl işlemsiz ve ısıl işlemlili tüm numunelerin bu değerin üzerinde olduğu söylenebilmektedir.

**Çizelge 5.** Numunelerin patlatma testi sonuçları

Numune	Basınç Değeri (Bar)
Isıl İşlemsiz	1500
350 °C-30 dk.	1340
350 °C-60 dk.	1320
350 °C-120 dk.	1320
450 °C-30 dk.	1290
450 °C-60 dk.	1260
450 °C-120 dk.	1260

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada bakır kaplı çelik boruların süneklilik değerlerinin iyileştirilmesi için farklı sıcaklık ve sürelerde ısıl işlem uygulanmıştır. Isıl işlemsiz bakır kaplı çelik borunun ve 6 farklı ısıl işlem parametresi ile elde edilmiş bakır kaplı çelik boruların mikroyapısal ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Uygulanan ısıl işlemin numunelerin tane ve faz yapısında belirgin bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Ancak, kalıntı gerilmelerin ve azalan dislokasyon yoğunluğunun azalmasıyla dayanım değerlerinde düşüş görülürken uzama değerlerinde artış görülmüştür. Ayrıca, mikroyapı ve kırık yüzey incelemelerine göre çelik-bakır ara yüzeyinde difüzyona bağlı olarak iyileşme olduğu söylenebilmektedir. Dayanım değerlerinde düşüş görülmesine rağmen ısıl işlem uygulanan tüm numuneler otomotiv sektörü fren borusu üretimi için gerekli mekanik özellikleri kabul kriterlerine göre karşılamaktadırlar. Dolayısıyla, bu çalışma göstermiştir ki dayanım değerlerini standartların altına düşürmeden bakır kaplı çelik boruların süneklilik değerleri ısıl işlemler ile iyileştirilebilmektedir.

#### 5. TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmaya desteklerinden dolayı Bant Boru A.Ş. ye ve Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü'ne teşekkür ederler.



## 6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## 7. YAZAR KATKISI

Ozan KOYUNCU çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, veri analizi ve yorumlama, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi, Burak ÇELİK çalışmanın veri toplama, veri analizi ve yorumlama, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi, Yasin AKGÜL çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi, Alper İNCESU çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi aşamalarında, son onay ve tam sorumluluk kısımlarında katkı sağlamıştır.

## 8. KAYNAKLAR

- Al-Ghamdi K.A., Hussain G., SPIF of Cu/steel clad sheet: annealing effect on bond force and formability. *Materials and Manufacturing Processes* 31:758–763, 2016.
- ASTM, A254/A254M-12: Standard Specification for Copper-Brazed Steel Tubing, 2019.
- Benchabane G., Boumerzoug Z., Thibon I., Gloriant T., Recrystallization of pure copper investigated by calorimetry and microhardness. *Materials Characterization* 59:1425–1428, 2008.
- Bundy H.W., Method for making a tube, 1932.
- Choi J.Y., Seong B.S., Baik S.C., Lee H.C., Precipitation and recrystallization behavior in extra low carbon steels. *ISIJ International* 42:889–893, 2002.
- Gu J., Song M., Annealing-induced abnormal hardening in a cold rolled CrMnFeCoNi high entropy alloy. *Scripta Materialia* 162:345–349, 2019.
- Han K.T., Park J.S., On the Forming of Brake Tube-End with Double Wall Structure for Automobiles. In: *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics 1178–1184, 2004.
- ISO, 6892-1: Metallic materials. Tensile testing Method of test at room temperature, 2019.
- Kavarana F.H., Ravichandran K.S., Sahay S.S., Nanoscale steel-brass multilayer laminates made by cold rolling: microstructure and tensile properties. *Scripta Materialia* 42:947–954, 2000.
- Kim J.K., Huh M.Y., Lee J.C., Jee K.K., Engler O., Evolution of strain states and textures during roll-cladding in STS/Al/STS sheets. *Journal of Materials Science* 39:5371–5374, 2004.
- Klakurková L., Horynová M., Juliš M., Gejdoš P., The use of microstructural analysis for the evaluation of quality of double-wall tubes. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publication 269–27, 2017.

- Lee J.E., Bae D.H., Chung W.S, Kim K.H., Lee J.H., Cho Y.R., Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets. *Journal of Materials Processing Technology* 187:546–549, 2007.
- Li Y.J., Choi P., Goto S., Borchers C., Raabe D., Kirchheim R., Evolution of strength and microstructure during annealing of heavily cold-drawn 6.3 GPa hypereutectoid pearlitic steel wire. *Acta Materialia* 60(9), 4005-4016, 2012.
- Liu B.X., An Q., Yin F.X., Wang S., Chen C. X., Interface formation and bonding mechanisms of hot-rolled stainless steel clad plate. *Journal of Materials Science* 54(17), 11357-11377, 2019.
- Liu B.X., Wei JY., Yang M.X., et al Effect of heat treatment on the mechanical properties of copper clad steel plates. *Vacuum* 154:250–258, 2018.
- Mishima Y., Aoki T., Itō G., Kiyooka S., Ono, K., Seki, Y., Sumitomo M., Takao, Z., Behavior of Cladding Tube under Coolant-Loss Accident Conditions. *Journal of Nuclear Science and Technology* 3(2), 72-82, 1966.
- Ravichandran K.S., Sahay S.S., Byrne J.G. Strength and ductility of microscale brass-steel multilayer composites. *Scripta Materialia* 35, 1996.
- SAE International, J1677, Tests and Procedures for Steel and Copper Nickel Tubing, 2004.
- SAE International, J527, Brazed Double Wall Low-Carbon Steel Tubing, 2017.
- Zhang G., Kang Y., Wang M., Xu H., Jia, H., Atomic diffusion behavior and diffusion mechanism in Fe–Cu bimetal casting process studied by molecular dynamics simulation and experiment. *Materials Research Express* 7(9):1-13, 096519, 2020.
- Zhang L.F., Gao R., Zhao B.L, Sun M., Jing K., Wang X.P., Hao T., Xie Z.M., Liu R., Fang Q.F., Liu C.S., Effects of annealing temperature and layer thickness on hardening behavior in cross accumulative roll bonded Cu/Fe nanolamellar composite. *Journal of Alloys and Compounds* 827:154312, 2020.

Araştırma Makalesi / Research Article

**Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Altı Eksenli Robot Kol ile Görüntü İşleme ve Yapay Zeka Tabanlı Ürünlerin Tasniflemesi**

Zekeriya KAYA<sup>1</sup>, Bekir AKSOY<sup>2\*</sup>, Koray ÖZSOY<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2887-2399>, zekeriya0055@gmail.com

<sup>2\*</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8052-9411>, bekiraksoy@isparta.edu.tr

<sup>3</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta OSB MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Isparta, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8663-4466>, korayozsoy@isparta.edu.tr

Geliş/ Received: 25.02.2023;

Kabul / Accepted: 11.04.2023

**ÖZET:** Çalışmada, 5+1 serbestlik derecesine sahip bir robot kolunun belirli bir konumdaki ve belirli biçimdeki bir objeyi tespit edip buna göre kontrol sağlaması amaçlanmıştır. Çalışılan teorik ve algoritmik yapının gerçek ve simülasyon uygulamalarında kullanılması hedeflenmiştir. Robot kolun uygulamasında gerçek zamanlı ve akıllı uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasında 6 adet adım motor kullanılarak robot kolun kontrolü için gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Robota gideceği konumu alacağı objeyi belirleme yeteneği görüntü işleme ve yapay zekâ yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak tasarım programları yardımıyla robot kol tasarlanmıştır. Tasarlanan robot kol eklemeli imalat yöntemiyle Biopolimer Polilaktik Asit (PLA) malzemesi kullanılarak imal edilmiştir. Tasarlanan robot kola uygun motor ve programlama kartı (PLC) uygulanmıştır. PLC hazırlanan yazılım ile altı eksen de programlanmıştır. Robot kolun uzuv uzunlukları ve eksen hareketlerine göre D-H tablosu hesaplanmıştır. Her bir eksen için dönüşüm matrisleri elde edilerek ileri ve ters kinematik hesaplamaları yapılmıştır. Çalışmada nesnelerin tespiti ve ağırlık merkezleri hesaplamak için görüntü işleme ve U<sup>2</sup>-Net yapay zekâ tekniği kullanılmıştır. Elde edilen RGB görüntüler üzerinde U<sup>2</sup>-Net yapay zekâ modeli kullanılarak arka plan silme işlemi gerçekleştirilmiş ve nesnelerin renge göre tespit edebilmek için renk uzayları HSV renk uzayına dönüştürülmüştür. Gerçekleştirilen çalışma ile parçaları üretilen ve yazılımı gerçekleştirilen robot kol 5+1 serbestlik dereceli eksenle hareket edebilen bir robot kolun görüntü işleme ve yapay zekâ tekniği kullanılarak toplam 20 adet deney yapılarak hata payları 0 mm ile 22 mm arasında değişen değerler aldığı belirlenmiş ve ortalama hata payı 10,5 mm olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Robot kol, Robotik, Eklemeli İmalat, Görüntü işleme, Yapay zekâ.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: bekiraksoy@isparta.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Kaya, Z., Aksoy, B., Özsoy K. (2023). Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Altı Eksenli Robot Kol ile Görüntü İşleme ve Yapay Zeka Tabanlı Ürünlerin Tasniflemesi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 193-210.

## Production of Six-Axis Robot Arms with Additive Manufacturing and Classification of Image Processing and Artificial Intelligence Based Products

**ABSTRACT:** In the study, it is aimed that a robot arm with 5+1 degrees of freedom can detect an object in a certain position and in a certain shape and provide control accordingly. It is aimed to use the studied theoretical and algorithmic structure in real and simulation applications. Real-time and smart applications have been realized in the application of the robot arm. During the design phase, the necessary calculations were made for the control of the robot arm by using 6 stepper motors. The ability of the robot to determine the object to which it will go, has been realized by using image processing and artificial intelligence methods. First, the robot arm was designed with the help of design programs. The designed robot arm was manufactured using Biopolymer Polylactic Acid (PLA) material with the additive manufacturing method. A suitable motor and programming card (PLC) has been applied to the designed robot arm. Six axes are programmed with the software prepared in PLC. D-H table was calculated according to the limb lengths and axis movements of the robot arm. Forward and inverse kinematics calculations were made by obtaining transformation matrices for each axis. In the study, image processing and U2-Net artificial intelligence technique were used to detect objects and calculate centers of gravity. Background deletion was performed on the obtained RGB images using the U2-Net artificial intelligence model, and the color spaces were converted to HSV color space to detect objects by color. A total of 20 experiments were carried out using image processing and artificial intelligence techniques of a robot arm that can move on an axis with 5+1 degrees of freedom, the parts of which were produced and the software of which was produced, and it was determined that the margins of error varied between 0 mm and 22 mm, and the average margin of error was It was determined as 10.5 mm.

**Keywords:** Robot arm, Robotics, Additive Manufacturing, Image processing, Artificial Intelligence.

### 1. GİRİŞ

Eklemeli imalat teknolojisi, üretilecek olan nihai parçayı çeşitli yöntemlerle üretmek için yüksek hassasiyetli malzeme biriktirme teknolojisidir (Ramírez ve ark., 2023). Uluslararası Amerikan test ve materyalleri topluluğu (ASTM) standardına (ASTM, 2012) göre Malzeme ekstrüzyonu (MEX), Tekne foto polimerizasyonu (VPP), Malzeme püskürtme (MJT), Levha laminasyonu (SHL), Toz yatağı füzyonu (PBF), Doğrudan enerji biriktirme (DED), Bağlayıcı püskürtme (BJT) olmak üzere yedi ana kategoride üç boyutlu(3B) baskı teknolojileri kullanılmaktadır (Awad ve ark., 2023). Eriyik Yığılma Modellemesi (FDM), ekonomik ve hızlı bir eklemeli üretim teknolojisinden bir tür malzeme ekstrüzyonudur (Zhang ve ark., 2023). Erimiş malzemenin katmanlar halinde biriktirilmesine dayanan bir tekniktir. FDM tekniği, diğer eklemeli imalat teknikleriyle karşılaştırıldığında, imalat parametrelerinin kolaylıkla değiştirilmesini kolay olmasından dolayı tasarım esnekliğine sahiptir (Brambilla ve ark., 2021).

FDM teknolojilerinde yapılan tasarımların üretilebilmesi için nesnelere iki boyutlu (2B) matematiksel ifadelerle dönüştürülmektedir. 3B nesnelere dönüşürken oluşan bir sahnenin basit iki değişkenli bir fonksiyon olarak tanımlanmasına “görüntü” denir. Başka bir ifade ile 3B nesnenin 2B haritasıdır (Büyükoçak 2018).

2B görüntü haritalarının önemli kullanım alanlarından birisi de robotik sistemlerdir. Robot kelimesi birçok programlanmış hareketi gerçekleştirmek için özel cihazları, malzemeleri ya da parçaların taşınması amacıyla tasarımı gerçekleştirilen birçok işlevi bulunan makine olarak tanımlanmaktadır (Barutçuoğlu 2001). Robotların tarım, hayvancılık, maden, metal endüstrisi, gıda, tekstil, ilaç sanayi, elektronik, eğitim, tıp gibi çok geniş alanına sahiptir. Robotik sistemler, karmaşık

bir sistem olarak kabul edilen bağlantı uzunlukları, eklem açıları ve kinematik mekanizmaların bir kombinasyonudur. Robot kolun eksen sayısı arttıkça hareket yeteneğinde de artmaktadır.

Literatürde 6 eksenli robot kollar ile ilgili birçok akademik çalışma bulunmaktadır. Lattanzi ve ark., çalışmalarında yüksek doğrulukta üretim görevi için 6 eksenli bir robotik kolun geometrik kalibrasyonun işlemini gerçekleştirmişlerdir (Lattanzi ve ark., 2020). Guida ve ark., çalışmalarında 6 eksenli robotik kolun kinematik analizi için modelleme tekniklerini geliştirmişlerdir (Guida ve ark., 2019). Bir diğer çalışmada 6 eksenli bir robot kola rastgele yerleştirilmiş bir çinko pres döküm ürün üzerinde harekete geçmesi yapay görme yöntemini kullanmışlardır (Butters ve ark., 2019). Jhang ve ark., çalışmalarında ise endüstriyel bir mobil robot kolunun çoklu sensör tabanlı eldiven kontrolünü gerçekleştirmişlerdir (Jhang ve ark., 2017). Talli ve ark., çalışmalarında robot görselleştirme yazılımı kullanılarak 6 eksenli bir robotun tasarımı, simülasyonu ve analiz işlemleri üzerine çalışmışlardır (Talli ve ark., 2020). Diğer bir çalışmada ise Mars 2020 robot kolunda doğru bir biçimde çalışması için 6 eksenli kuvvet-tork sensörünün iki aşamalı kalibrasyonunu gerçekleştirmişlerdir (Schaler ve ark., 2021). Li ve ark., çalışmalarında 6 eksenli hibrit ekleme-çıkarma üretim sürecinde tasarım ve örnek bir olay üzerinde inceleme yapmışlardır (Li ve ark., 2018). Sahu ve ark., çalışmalarında sonlu elemanlar analizi kullanan 6 eksenli bir endüstriyel robotun titreşim analizlerini gerçekleştirmişlerdir (Sahu ve ark., 2017). Cristalli ve ark., gerçekleştirdikleri akademik çalışmada ise yüksek doğrulukta üretim görevi için bilişsel robot referanslama sistemini araştırmışlardır (Cristalli ve ark., 2017). Kayışlı ve Uğur yapmış oldukları çalışmada üç serbestlik derecesine sahip robotun uç işlevcisine değişken kuvvet uygulanarak dayanıklılığının bulanık mantık ve PID kontrol yöntemiyle simülasyon ortamında gerçekleştirerek karşılaştırmalı olarak vermişlerdir (Kayışlı ve Uğur, 2017). Havusoğlu yapmış olduğu çalışmada alüminyum parçalar ve servo motorlar kullanarak tasarlamış olduğu robot kolu tasarımı, kinematik analiz, etkileşimli kontrol üzerine odaklanmıştır. Ayrıca hazırlanan bilgisayar ara yüz programıyla gerçek zamanlı kontrol uygulamaları da geliştirmiştir Havusoğlu, 2014). Bir diğer çalışmada Berki tasarlamış olduğu robot kolun yapay sinir ağlarıyla kontrolünün nasıl sağlanabileceği konusunda yaptığı çalışma sonucunda robot kollara ait kontrol sistemi tasarımı için yapay sinir ağlarının alternatif bir yöntem olarak tercih edilebileceği ifade etmiştir (Berki, 2013). Ayyıldız ve Çetinkaya yapmış oldukları çalışmada, görüntü işleme kullanılarak farklı nesnelerin geometrik şekillerini tahmin etmek için bir yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Daire, kare, üçgen ve dikdörtgen şeklinde nesnelere deneysel işlemler kullanarak geometrik şekillerin özelliklerini çıkarmak için alan, çevre, kompaktlık, uzama, dikdörtgendik ve yuvarlaklık gibi morfolojik özellikler kullanmıştır. Yapay sinir ağı eğitimi sonrasında, eğitim ve test verileri için geometrik şekil değerlerinin korelasyon katsayıları ( $R^2$ ) değeri 1'e çok yakın olarak elde ederek yapay sinir ağının görüntü işleme kullanarak geometrik şekillerin tahmini için kabul edilebilir bir model olduğunu göstermişlerdir (Ayyıldız ve Çetinkaya, 2017).

Robot kontrol sistemlerinde sıklıkla kullanılan yöntemlerden birisi de görüntü işleme ve yapay zekâ teknikleridir. Görüntü işleme, görüntüler üzerinden özellikleri ve nitelik çıkarma işlemidir. Görüntü işleme teknolojisi, görüntünün kalitesi artırmak, gürültüyü azaltmak, görüntü üzerindeki herhangi bir nesnenin sınıflandırılması veya nesnelerin tanımlanması gibi birçok amaç için kullanılmaktadır (Russ ve Neal, 2016; Özsoy ve ark., 2021). Görüntülerin iyileştirilmesi için görüntünün kontrastı azaltma/artırma, değiştirme veya gelişmiş filtreleme teknikleri gibi farklı teknikler kullanılmaktadır (Yılmaz, 2007). Görüntü üzerindeki bulunan nesnelerin kenarları ve nesnelerin konumları elde etmek için ise görüntü segmentasyonu, renk uzayları ve kenar bulma algoritmaları kullanılır (Elhedda ve ark., 2017; Bilic ve ark. 2023; Zhou ve ark., 2023; You ve ark., 2023).

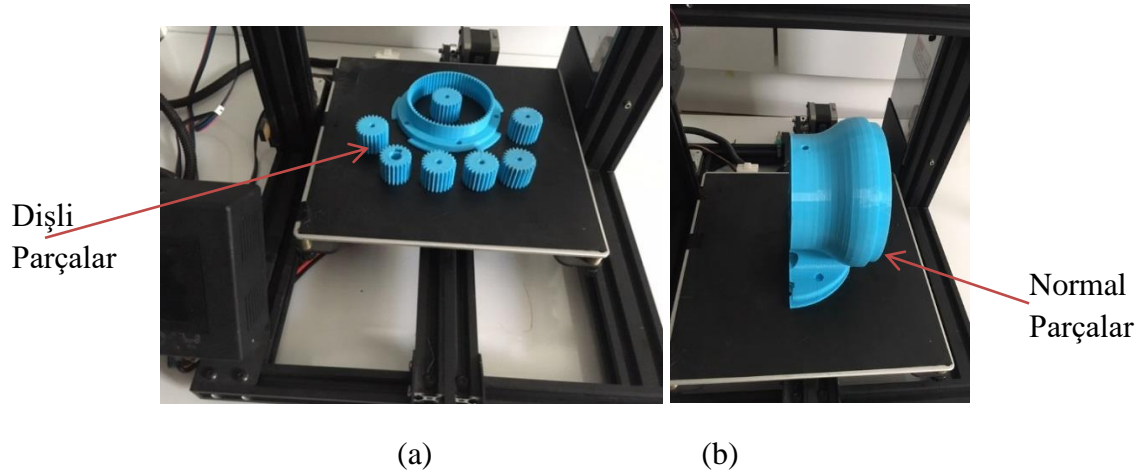
Çalışmada eklemeli imalat yöntemi ile imalatı gerçekleştirilen 5+1 eksenli robot kol tasarlanarak geliştirilmiştir. Robot kol ilk çalıştığında manuel olarak başlangıç noktasına (Home İşlemi) gitmesi sağlanmıştır. İkinci aşamada ise robot kola entegre edilen kamera kullanılarak bant üzerinde hareket etmesi sağlanmıştır. Bant üzerinde geçen nesnelere ait görüntülerde ilk olarak U2-Net yapay zekâ yöntemi kullanılarak görüntülerin arka planları silinerek tespit edilmiştir. Bir sonraki aşamada ise tespit edilen nesnelere rengine göre sınıflandırılarak konumları hesaplanmaktadır. Çalışmada mavi, sarı ve kırmızı olmak üzere üç farklı renge ait sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Robot kol tespit edilen nesnenin rengine göre belirlenen konumlara hareket etmesi sağlanarak belirlenen bir noktadan nesne alınıp hedef konuma bıraktıktan sonra başlangıç konumuna dönmesi sağlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1 Materyal

#### 2.1.1 3B Yazıcı ve Filament Özellikleri

Çalışmada altı eksenli robot kolun her bir parçasının 3B yazıcı ile üretim aşamaları Şekil 1’de, 3B yazıcının teknik özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.



Şekil 1. 3B yazıcı imalat görüntüleri, a) dişli imalatı ve b) ön kol imalatı

Çizelge 1. 3B yazıcının teknik özellikleri

Adı	Birim	Boyutlar
Baskı alanı	mm	255x255x260
Tabaka kalınlığı	mikron	20
Materyal		PLA/ABS/HIPS/WOOD/PC/PVC
Baskı teknolojisi		Fused filament fabrication (FFF)
Uyumlu filament çapı	mm	1,75
Nozzle çapları	mm	0,2/0,3/0,4
Ağırlık	kg	8,5
İmalat ölçüleri	mm	478x455x520
Yapı plakası		110 °C ısıtmalı cam yapı plakası (max)
Maksimum güç çıkışı	W	360
Dosya transferi		SD kart
Baskı yazılımı		Cura/Tronxy slicer

Çalışmada altı eksenli robot kolun 3B yazıcı ile imalatında kullanılan PLA türündeki filament malzemesinin teknik özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. PLA ve filamentlerin teknik özellikleri

Baskı sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Bozulma sıcaklığı (°C,0,45 MPa)	Gerilme direnci (MPa)	Kopma uzaması (%)	Eğilme direnci (MPa)	Etki dayanıklılığı (kJ/m <sup>2</sup> )
205-225	1,24	52	60	29	87	7

Robot kolun üretim aşamasında yaklaşık olarak 6 kg filament kullanılmıştır. Kullanılan filamentin %25’i üretim aşamasında nesne destekleri olarak kullanılmıştır. Kalan %75’lik kısım robotun gerçek ağırlığı oluşturmaktadır. Üretilen tüm parçaların %55 doluluk oranı ile imal edilmiştir.

### 2.1.2 Elektrik-Elektronik Sistem Tasarımı

Çalışmada 6 eksenli robot kolun elektrik elektronik sistem tasarımında denetleyici olarak Siemens marka S7 1200 PLC kullanılmıştır. PLC sistemi içerisinde güç kaynağı, CPU, yüksek hızlı hareket kontrol sistemi, mikroişlemci, giriş devresi, çıkış devresi gibi bileşenler ile profinet, analog giriş ve çıkışları da bulunmaktadır. Ayrıca PLC cihazında; RS485, GPRS, RS232, Profibus gibi haberleşme modülleri mevcuttur (Siemens, 2019).

### 2.1.3 Adım Motorları ve Sürücüleri

Adım motorlar, girişlerine uygulanan darbe dizilerine karşılık analog dönme hareketi yapan fırçasız ve genellikle kalıcı mıknatıs kutuplu olan DC motorlardır. Bu motor tipinin ilk olarak 1930’lu yıllarda ortaya çıkmasıyla gemi ve çeşitli savaş ağırlıklı sistemlerde kullanılmaya başlanmıştır. (Altun vd., 2016). Çalışmada TB6600 adım motor sürücüsü kullanılmıştır.

### 2.1.4 Robot Kinematığı

Kinematik, harekete neden olan kuvvetleri veya momentleri dikkate almadan cisimlerin hareketini inceleyen bilim dalıdır. Robot kinematığı ise bir robot manipülatörünün hareketini analitik olarak ifade edilmesidir. Robot mekanizması için uygun kinematik modellerin matematiksel olarak ifade edilmesi, endüstriyel manipülatörlerin davranışını analiz etmek için oldukça önemlidir (Öğülmüş 2022). Manipülatörlerin kinematik modellemesinde kartezyen koordinat uzayı ve kuaterniyon uzayı olmak üzere iki farklı uzay sistemi kullanılmaktadır. Kartezyen koordinat sisteminde hareket ifadeleri dönme ve öteleme olmak üzere ikiye balık altında incelenmektedir. Dönme dönüşümde ise Euler açıları, Gibbs vektörü, Cayley-Klein parametreleri, Pauli spin matrisleri, eksen ve açısı, ortonormal matrisler ve Hamilton’un dördeyleri gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu dönüşümlerde 4x4 gerçek matrislere (ortonormal matrisler) dayalı homojen dönüşüm matrisleri sıklıkla tercih edilmektedir. Denavit-Hartenberg (DH) parametreleri olarak bilinen bu parametreler, robot kinematığında kullanılan bir analiz yöntemi olarak sıklıkla tercih edilmektedir (Küçük ve Bingül, 2016). Geliştirilen 5+1 serbestlik derecesine sahip robot kolun D-H tablosu oluşturulmuştur. D-H tablosunda robotun uzuv uzunlukları ve açıları belirlenmiştir. D-H tablosu kullanılarak dönüşüm matrisi her eksen için hesaplanarak robotun ileri kinematik analizi yapılmıştır.

### 2.1.5 U<sup>2</sup>-Net Yapay Zekâ Modeli

U<sup>2</sup>-Net, görüntü segmentasyonu için kullanılan bir yapay zekâ modelidir. U<sup>2</sup>-Net modeli, özellikle doğal sahnelerin segmentasyonu için kullanılmaktadır. U<sup>2</sup>-Net, çeşitli evrişimsel sinir ağı katmanlarının birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Model, görüntü segmentasyonu, görüntü tamamlama, nesne tanıma gibi birçok uygulama alanında kullanılabilir. U<sup>2</sup>-Net, açık kaynak kodlu ve kullanıcılar tarafından geliştirilebilen bir yapay zekâ modelidir (Ye ve ark., 2022; Shao ve ark., 2022).

### 2.1.6 HSV Renk uzayı

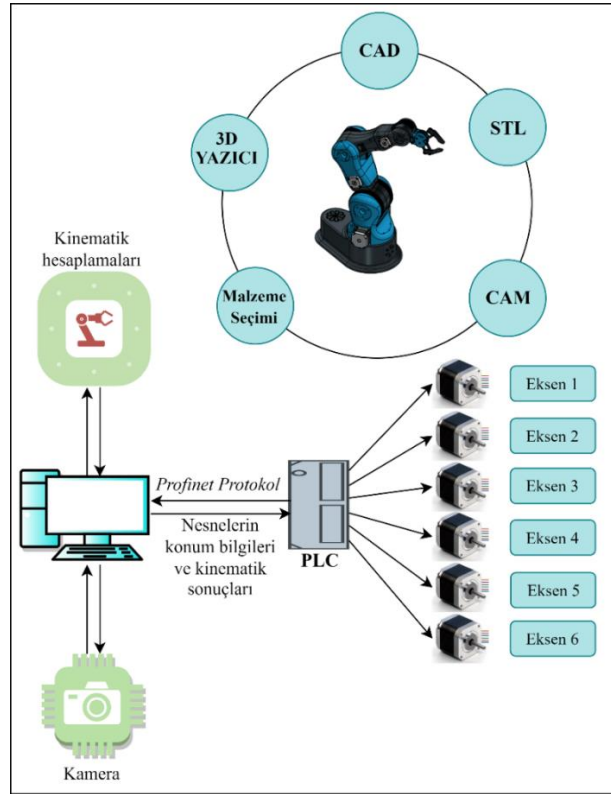
Görüntü işleme alanında yaygın olarak kullanılan renk uzaylarından biriside Hue-Saturate-Value (HSV) renk uzayıdır. HSV renk uzayı H (renk derinliği), S (renk saflığı), V (renk parlaklığı) olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. HSV renk uzayındaki H değeri baskın dalga boyu ile ilişkili olduğu için görüntüdeki baskın rengi temsil etmektedir. S bileşeni ise beyaz bir referans değere göre tonun ne kadar saf olduğunu gösteren renk saflığını temsil etmektedir (Doğan ve ark., 2022).

## 2.2. Yöntem

### 2.2.1 5+1 Eksenli Robot Kolun Tasarımı, İmalatı ve Kontrolü

Çalışmada geliştirilen 5+1 eksenli robot koluna ait iş akış diyagramı Şekil 2’te verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde geliştirilen robotun iki ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde robot kolun tasarımı ve imalatı kapsarken ikinci bölümünde ise robot kolun kontrolünü içermektedir. Robot kolun tasarım ve imalat bölümü CAD, STL, CAM, malzeme seçimi ve 3B yazıcı ile üretilmesi olmak üzere beş aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada robot kolun katı modellemesi CAD tasarım programları ile tasarlanmıştır. İkinci aşamada ise tasarlanan 3B katı modelleri STL formatına dönüştürülmüştür. Sonraki aşamada ise STL formatına çevrilen parçaların CAM programları ile dilimleme işlemi (G kodları) yapılarak parçaları imalat süreci için hazır hale getirilmiştir. Dördüncü aşamada ise parçaların üretimi için PLA malzemesi tercih edilmiştir. Son aşamada ise tasarlanan parçaların 3B yazıcı ile imalatı gerçekleştirilmiştir. Robot kolun kontrol bölümü ise PLC, bilgisayar, kamera, kinematik ve adım motorlarından oluşmaktadır. Kameradan alınan görüntüler bilgisayara aktırılarak görüntülerin içerisinde nesne bulunup bulunmadığı tespit edilmektedir. Bir nesne tespit edildiğinde nesnenin konum bilgilerine göre ters kinematik hesaplamaları yapılmaktadır. Ters kinematikten elde edilen eksenlerin açıları profinet haberleşme protokolüyle PLC’ye gönderilir. PLC’ye gelen aç bilgileri pulse dönüştürerek adım motorlarına sinyal gönderilerek robot kolun tahrik işlemi gerçekleştirilmektedir.

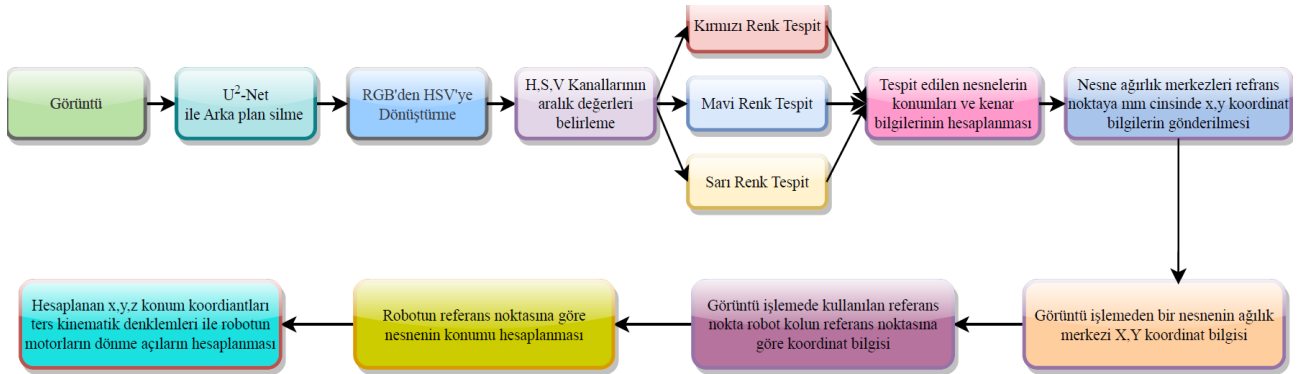




Şekil 2. Çalışmanın iş akış diyagramı

### 2.2.2 Görüntü İşleme Teknikleri ile Ürün Tasnifleme

Çalışmada Şekil 3’de verilen akış diyagramı kullanılarak görüntüler üzerinde nesnelerin tespiti ve ağırlık merkezleri hesaplanmıştır. Ayrıca görüntü işleme tekniklerini kullanabilmek için Python programlama dilinde çalışmaya özel bir yazılım geliştirilmiştir.



Şekil 3. Görüntü işleme ile nesne tespiti ve konum bilgileri hesaplama

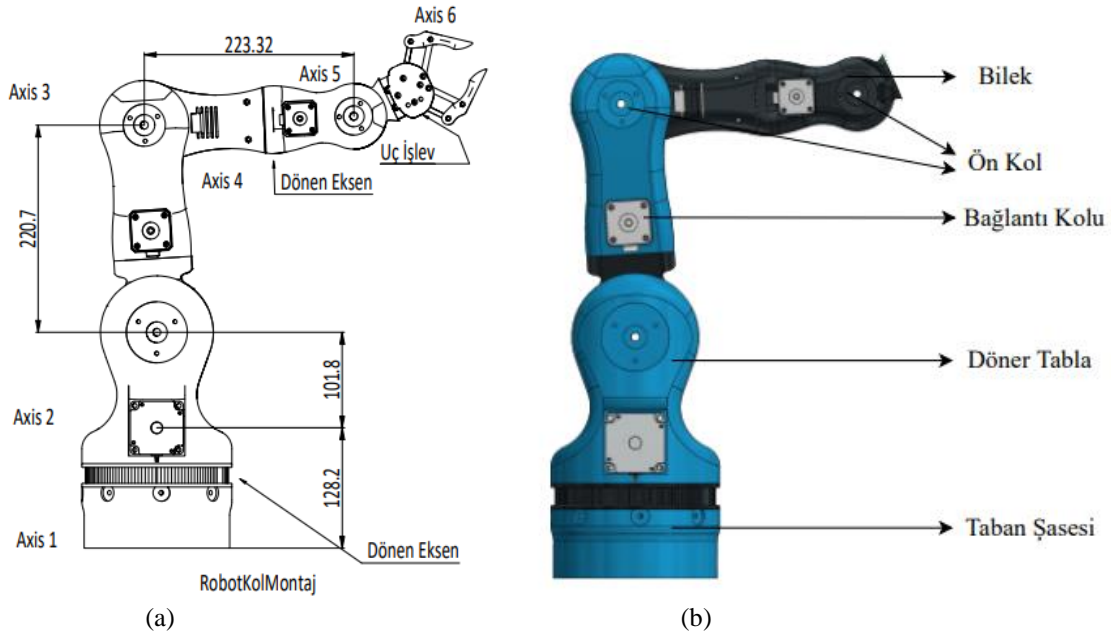
Şekil 3 incelendiğinde ilk olarak RGB görüntüler üzerinde arka plan silmek için yapay zeka tabanlı ve önceden eğitilmiş U<sup>2</sup>-Net yapay zeka yöntemi kullanılmıştır. İkinci aşamada ise arka planı silinmiş görüntülerin üzerindeki nesnelerin rengine göre tespit edebilmek için renk uzayları HSV’ye dönüştürülmüştür. Bir sonraki aşamada ise HSV renk uzayına dönüştürülen görüntüler üzerinde H, S ve V kanallarına 0-255 arasında bir aralık seçilmiştir. Seçilen aralık dışında kalan tüm pikseller arka plana ait olduğu kabul edilmiştir. Belirlenen H, S ve V renk kanal değerlerine göre çalışmada kullanılan sarı, mavi ve kırmızı nesnelerin tespit edilmiştir. Sarı renk için H kanalın alt değeri 20 ve üst değeri 30 olarak seçilmiş, S ve V kanalların alt değerleri 100 ve üst değerleri 255 olarak seçilmiştir. Mavi renk için H kanalın alt değeri 90 ve üst değeri 120, S kanalın alt değeri 80 ve üst

değeri 255 ve V kanalın alt değeri 2 ve üst değeri 255 olarak seçilmiştir. Son olarak kırmızı renk için H kanalın alt değeri 136 ve üst değeri 180, S kanalın alt değeri 87 ve üst değeri 255 ve V kanalın alt değeri 111 ve üst değeri 255 olarak seçilmiştir. Nesne tespit işleminden sonra görüntü tekrar RGB renk uzayına dönüştürülmüştür. RGB resimler üzerinde işlem maliyetini azaltmak için görüntüler gray scale (siyah-beyaz) dönüştürülmüştür. Gray görüntü üzerinde hangi bölgelerde nesne olduğu tespit etmek için eşikleme (thresholding) işlemi gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki aşamada ise görüntü üzerindeki tespit edilen nesne sınır bilgileri ve alanı hesaplamak için contours fonksiyonu ile nesneleri sınır noktaları hesaplanmıştır. Son aşamada ise find contours fonksiyonu ile hesaplanan sınır bilgilerine göre nesnenin ağırlık merkezi hesaplayarak bir referans noktaya göre nesnenin ağırlık merkezinin x ve y konum koordinatları milimetre cinsinden hesaplanmıştır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1 Robot Kol Tasarımı

Çalışmada 6 eksenli robot kolun tasarımı ve uzuvlarına ait teknik bilgiler Şekil 4’de gösterilmiştir. Robot kolun tasarım STL dosyaları grapcad platformuna yüklenerek açık kaynak kodlu erişimi sağlanmıştır (Grapcad 2023)



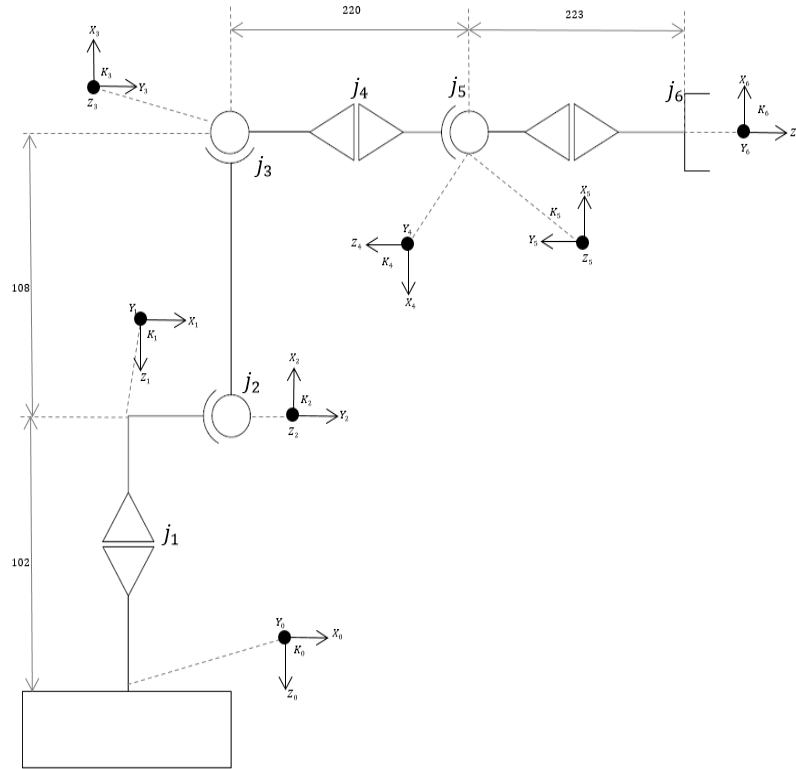
Şekil 4. 6 eksenli robotun (a) temel ölçüleri (b) uzuvların tanımlanması

#### 3.2 İleri Kinematik Hesaplama Sonuçları

Çalışmada tasarlanan altı eksenli robot kolun D-H Tablosu Çizelge 3’te ve ileri kinematik diyagram görüntüsü Şekil 5’de verilmiştir.

Çizelge 3. D-H tablosu

D-H tablosu				
Eksen NO	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$ (m)	$\theta_i$	$d_i$ (m)
0	0	102	-	-
1	90	0	128	$\theta_1$
2	0	220	0	$\Theta_2-90$
3	90	0	0	$\theta_3$
4	-90	0	223	$\Theta_4+180$
5	90	0	0	$\Theta_5+180$
6	0	0	x	$\Theta_6$



Şekil 5. İleri kinematik diyagram görüntüsü

Şekil 5’de görüldüğü gibi ilk eklem açısının hesaplanması için vektörün izdüşümü kullanılmaktadır. Uç işlevcinin bulunduğu konuma göre 6 eksenli robot kolun uzun konumlarının ileri kinematik değerlerini elde etmek için Eşitlik 1 ile Eşitlik 3 arasında verilen matematiksel ifadeler kullanılmıştır.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \cos \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \cos \alpha_{i-1} \cos \theta_i & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \sin \alpha_{i-1} \cos \theta_i & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Eşitlik 1’de ( $i$ ) eksen takımı ( $i - 1$ ) eksen takımına göre  ${}^{i-1}T_i$  dönüşüm matrisi elde edilmektedir. Eşitlik 2’de referans eksen takımından uç işlevci eksen takımına kadar olan dönüşüm matrislerinin çarpımına ait matematiksel ifade verilmiştir.

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \quad (2)$$

Eşitlik 3’de ise ileri kinematikte referans esken takımına göre uç işlevcinin eksen takımı dönüşüm matrisi verilmiştir. Matris son sütununda yer alan x, y ve z değerleri uç işlevcinin konum koordinatını ifade etmektedir. Ayrıca  $r_{14}$ , x eksenindeki konumu ( $P_x$ ),  $r_{24}$ , y eksenindeki konumu ( $P_y$ ) ve  $r_{34}$  ise z eksenindeki konumu ( $P_z$ ) temsil etmektedir.

$${}^0T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 3.3 Ters Kinematik Hesaplama Sonuçları

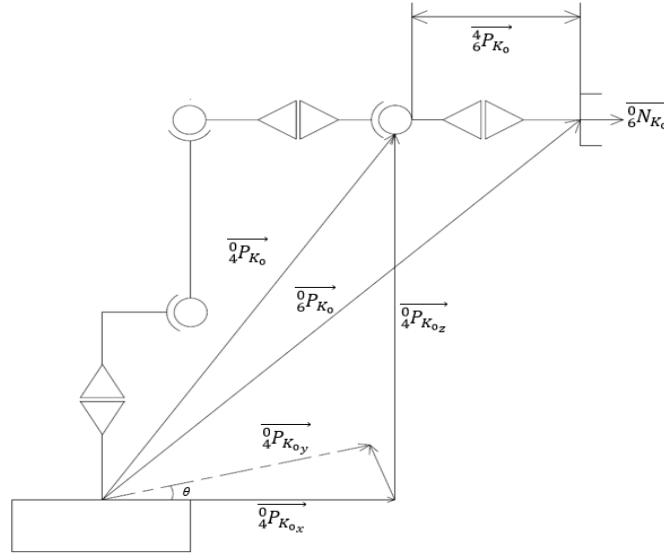
Şekil 6’daki gibi ters kinematik diyagramı verilen 6 eksenli robot kolun ilk eklem açısının hesaplanması için vektörlerin izdüşümleri kullanılmıştır. Eşitlik 4 ve Eşitlik 5’de robot kolun tersi kinematik analizi için kullanılan matematiksel ifadeler verilmiştir.

$${}^0T = \begin{bmatrix} {}^0T_{11} & {}^0T_{12} & {}^0T_{13} & {}^0T_{14} \\ {}^0T_{21} & {}^0T_{22} & {}^0T_{23} & {}^0T_{24} \\ {}^0T_{31} & {}^0T_{32} & {}^0T_{33} & {}^0T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow {}^0N_{K_0} = \begin{bmatrix} {}^0T_{13} \\ {}^0T_{23} \\ {}^0T_{33} \end{bmatrix} \begin{cases} {}^0N_{K_0} = d_6 \times {}^0N_{K_0} \\ {}^0P_{K_0} = \begin{bmatrix} {}^0T_{14} \\ {}^0T_{24} \\ {}^0T_{34} \end{bmatrix} \end{cases} \Rightarrow {}^4P_{K_0} = {}^0P_{K_0} - {}^4P_{K_0} = \begin{bmatrix} {}^0T_{14} - d_6 {}^0T_{13} \\ {}^0T_{24} - d_6 {}^0T_{23} \\ {}^0T_{34} - d_6 {}^0T_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Eşitlik 4’te  ${}^0T$  hedef transform matrisi iken K ise frame temsil etmektedir.

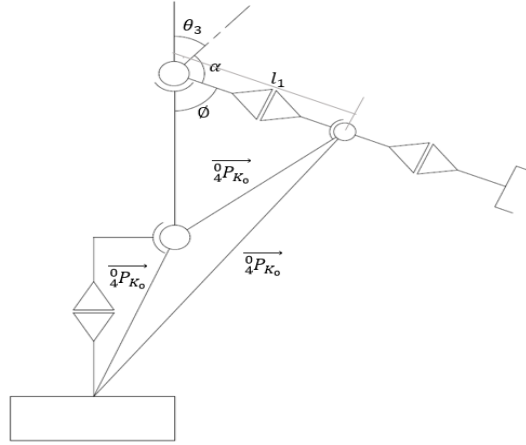
$$\theta_1 = \begin{cases} \text{ArcTan2}({}^0T_{24} - d_6 {}^0T_{23}, {}^0T_{14} - d_6 {}^0T_{13}) \\ \text{ArcTan2}({}^0T_{24} - d_6 {}^0T_{23}, {}^0T_{14} - d_6 {}^0T_{13}) + \pi \end{cases} \quad (5)$$

Eşitlik 5’te  $\theta_1$  ise ilk eklemin açısıdır.



Şekil 6. Ters kinematik diyagram görüntüsü

Şekil 7’de gösterilen üçüncü eklem açısının hesaplanması için Eşitlik 6 ile Eşitlik 9 arasında matematiksel ifadeler kullanılmıştır. İlk olarak  $\theta_2 = 0$  kabul edip Eşitlik 6 kullanılarak dönüşüm matrisinden  $K_0$  çerçevesi ile  $K_4$  çerçevesi arasındaki  ${}^4P_{K_0}$  değeri hesaplanmıştır. Daha sonra Eşitlik 7 ile Eşitlik 9’da verilen matematiksel ifadeler kullanılarak  $\theta$ ,  $\alpha$  ve  $\theta_3$  açı değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 7. Üçüncü eklem açısı için ters kinematik diyagram görüntüsü

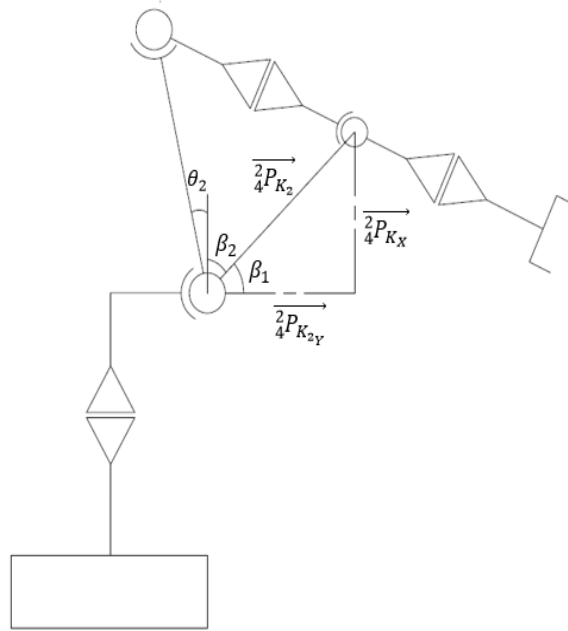
$${}^0_2T = \begin{bmatrix} {}^0_2T_{11} & {}^0_2T_{12} & {}^0_2T_{13} & {}^0_2T_{14} \\ {}^0_2T_{21} & {}^0_2T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ {}^0_2T_{31} & {}^0_2T_{32} & {}^0_2T_{33} & {}^0_2T_{34} \end{bmatrix} \Rightarrow \overrightarrow{{}^0_2P_{K_0}} = \begin{bmatrix} {}^0_2T_{14} \\ {}^0_2T_{24} \\ {}^0_2T_{34} \end{bmatrix} \xrightarrow{{}^2_4P_{K_0} = {}^2_4P_{K_0} - {}^0_4P_{K_0}} \overrightarrow{{}^2_4P_{K_0}} = \begin{bmatrix} \overrightarrow{{}^2_4P_{K_{0x}}} \\ \overrightarrow{{}^2_4P_{K_{0y}}} \\ \overrightarrow{{}^2_4P_{K_{0z}}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\phi = \text{ArcSin} \left( \frac{(l_1^2 - a_2^2 + |\overrightarrow{{}^2_4P_{K_0}}|^2)}{2|\overrightarrow{{}^2_4P_{K_0}}|l_1} \right) + \text{ArcSin} \left( \frac{\left( \frac{|\overrightarrow{{}^2_4P_{K_0}}|}{2} \frac{l_1^2 - a_2^2 + |\overrightarrow{{}^2_4P_{K_0}}|^2}{|\overrightarrow{{}^2_4P_{K_0}}|} \right)}{a_2} \right) \quad (7)$$

$$\alpha = \text{ArcTan}(-d_4, a_3) \quad (8)$$

$$\theta_3 = \begin{cases} \pi - \phi - \alpha \\ \pi + \phi - \alpha \end{cases} \quad (9)$$

Şekil 8'de gösterildiği gibi ikinci eklem açısının hesaplanması için Eşitlik 10 ile Eşitlik 16 arasındaki matematiksel ifadeler kullanılmıştır. İlk olarak Eşitlik 10 kullanılarak dönüşüm matrisinden  $K_2$  çerçevesi ile  $K_4$  çerçevesi arasındaki  $\overrightarrow{{}^2_4P_{K_2}}$  değeri hesaplanmamıştır. Daha sonra  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  ve ikinci eklem açısı olan  $\theta_2$  değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 8. İkinci eklem açısı için ters kinematik diyagram görüntüsü

$$\overrightarrow{{}_4P_{K_2}} = {}^2R_4 \overrightarrow{{}_2P_{K_0}} = {}^0R^{-1} \overrightarrow{{}_4P_{K_0}} \tag{10}$$

$${}^0T = \begin{bmatrix} {}^0P & {}^0P_{ORG} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow {}^0T = \begin{bmatrix} {}^0T_{11} & {}^0T_{12} & {}^0T_{13} \\ {}^0T_{21} & {}^0T_{22} & {}^0T_{23} \\ {}^0T_{31} & {}^0T_{32} & {}^0T_{33} \end{bmatrix} = {}^2R^{-1} \tag{11}$$

$$\overrightarrow{{}_4P_{K_2}} = \begin{bmatrix} {}^0T_{11} & {}^0T_{12} & {}^0T_{13} \\ {}^0T_{21} & {}^0T_{22} & {}^0T_{23} \\ {}^0T_{31} & {}^0T_{32} & {}^0T_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overrightarrow{{}_4P_{K_0x}} \\ \overrightarrow{{}_4P_{K_0y}} \\ \overrightarrow{{}_4P_{K_0z}} \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\beta_1 = \text{ArcTan}2(\overrightarrow{{}_4P_{K_2x}}, \overrightarrow{{}_4P_{K_2y}}) \tag{13}$$

$$\beta_2 = \text{ArcSin}\left(\frac{a_2^2 - |\overrightarrow{{}_4P_{K_0}}|^2 + l_1^2}{2l_2 a_2}\right) + \text{ArcSin}\left(\frac{l_1 - \frac{a_2^2 - |\overrightarrow{{}_4P_{K_0}}|^2 + l_1^2}{2l_1}}{|\overrightarrow{{}_4P_{K_0}}|}\right) \tag{14}$$

$$\theta_2 = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - (|\beta_1| + \beta_2) \\ \frac{\pi}{2} + (|\beta_1| - \beta_2) \end{cases} \tag{15}$$

$${}^0T = \begin{bmatrix} {}^0T_{11} & {}^0T_{12} & {}^0T_{13} & {}^0T_{14} \\ {}^0T_{21} & {}^0T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ {}^0T_{31} & {}^0T_{32} & {}^0T_{33} & {}^0T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \overrightarrow{{}_4N_{K_0}} = \begin{bmatrix} {}^0T_{13} \\ {}^0T_{23} \\ {}^0T_{33} \end{bmatrix} \tag{16}$$

Beşinci eklem açısını hesaplanmak için ise Eşitlik 17 ve Eşitlik 18’de verilen matematiksel ifadeler kullanılmıştır.  $\theta_4 = 0$  olarak kabul edilip  $\overrightarrow{40N_{K_0}}$  vektörü kullanılarak  $\theta_5$  açısı değeri hesaplanmıştır.

$$\theta_5 = \pi - \text{ArcCos}(\overrightarrow{40N_{K_0}} \cdot \overrightarrow{60N_{K_0}}) \quad (17)$$

$${}^4R = {}^0R^{-1}{}^0R = {}^4R^0R \quad {}^4R = \text{Rot}_z(\theta_4)\text{Rot}_y(\theta_5 + \pi)\text{Rot}_z(\theta_6) \quad (18)$$

Dördüncü ve altıncı eklemlerin açılarını hesaplanmak için Eşitlik 19 ile Eşitlik 23 arasındaki matematiksel ifadeler kullanılarak  $\theta_4$  ve  $\theta_6$  hesaplamak için  ${}^4R$  rotasyon matrisi kullanılmıştır.

$$\text{Rot}_y(\theta_5 + \pi) = \begin{bmatrix} \cos(\pi + \theta_5) & 0 & \sin(\pi + \theta_5) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\pi + \theta_5) & 0 & \cos(\pi + \theta_5) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\text{Rot}_z(\theta_6) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_6) & -\sin(\theta_6) & 0 \\ \sin(\theta_6) & \cos(\theta_6) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

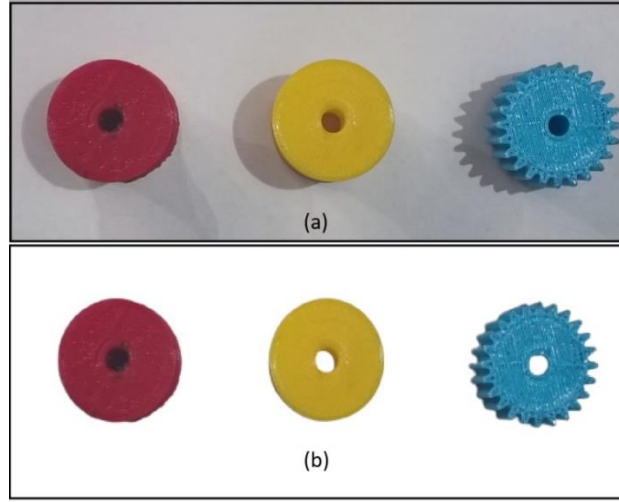
$${}^4R = \begin{bmatrix} -c_4c_5c_6 - s_4s_6 & c_4c_5s_6 - s_4c_6 & -c_4s_5 \\ -s_4c_5c_6 + c_4s_6 & s_4c_5s_6 + c_4c_6 & -s_4s_5 \\ s_5c_6 & -s_5s_6 & -c_6 \end{bmatrix} {}^4R = \begin{bmatrix} {}^4R_{11} & {}^4R_{12} & {}^4R_{13} \\ {}^4R_{21} & {}^4R_{22} & {}^4R_{23} \\ {}^4R_{31} & {}^4R_{32} & {}^4R_{33} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\theta_4 = \text{ArcTan}(-{}^4R_{23}, -{}^4R_{13}) \quad (22)$$

$$\theta_6 = \text{ArcTan}({}^4R_{32}, {}^4R_{31}) \quad (23)$$

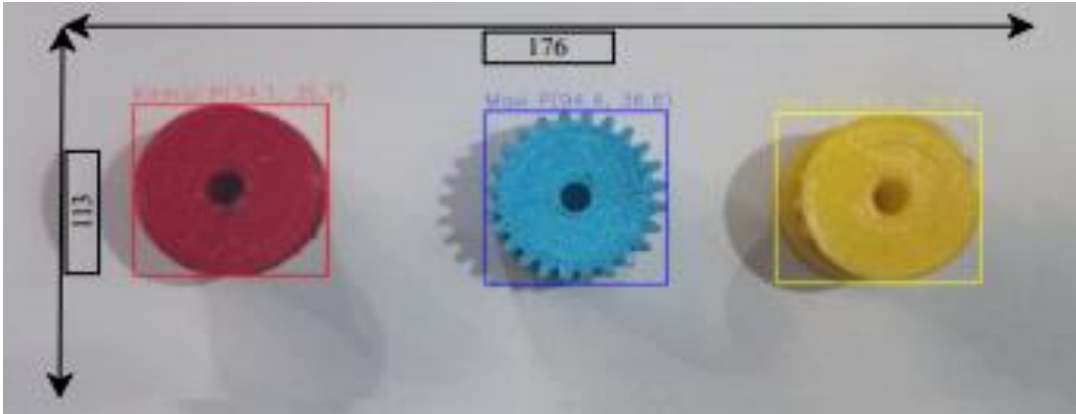
### 3.4 Görüntü İşleme ve Yapay Zekâ Tabanlı Ürün Tasnifleme Sonuçları

Çalışmada önceden eğitilmiş  $U^2$ -Net yapay zekâ modeli kullanılarak alınan görüntülerin arka plan silme işlemi için kullanılmıştır.  $U^2$ -Net modeli ile elde edilen arka plan silme işleminin örnek sonuca ait görsel Şekil 9’da verilmiştir. Şekil 9 incelendiğinde  $U^2$ -Net yapay zekâ modelinin arka plan silmede oldukça başarılı olduğu görülmektedir.



Şekil 9. U<sup>2</sup>-Net ile arka plan silme işlemi

Çalışmada kullanılan görüntü işleme algoritmalarından elde edilen ürün tespiti ve tasnifleme sonuçları Şekil 10’da gösterilmiştir. Şekil 10 incelendiğinde algoritmanın yüksek doğrulukta çalıştığı görülmektedir. Çalışmada mavi, kırmızı, sarı olmak üzere nesnelerin üç kategoriye ayrılmıştır. Bu nesnelerin sınıflandırılması ve ağırlık merkezleri yüksek doğrulukta gerçekleştirilmiştir.

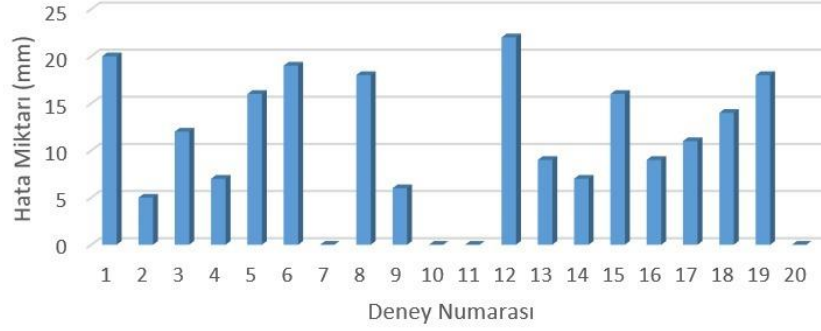


Şekil 10. Ürün tespiti ve tasnifleme

### 3.5 Robot kolun çalışmasının doğruluk analizi

Çalışmada geliştirilen robot kolun doğruluk analizi yapmak için 20 adet deney yapılmıştır. Her deneyde belirlenen konum ve hedef konum arasındaki hata payı milimetre olarak ölçülmüştür. Yapılan deneylerden elde edilen hata değerleri Şekil 11’de verilmiştir. Şekil 11 incelendiğinde hata paylarının 0 mm ile 22 mm arasında değiştiği görülmektedir. Bu nedenle ortalama olarak robot kolun ortalama hata değeri 10,50 mm olarak tespit edilmiştir.





Şekil 11. Robot kolun çalışmasının doğruluk analizi

Yapılan çalışmadaki konum doğruluğu ile ilgili akademik literatür incelendiğinde; Joubair vd. yapmış oldukları simülasyon çalışmasında, ileri kinematik tabanlı kalibrasyon yöntemi kullanılarak 6 serbest dereceli robotun hedef çalışma alanı içindeki maksimum konum hatası 5,957 mm'den 0,851 mm'ye ve ortalama konum hatası 3,992 mm'den 0,3871'e optimize etmişlerdir (Joubair ve ark., 2015). Bir diğer çalışmada Joubair ve ark., simülasyon çalışmasında, kuvvet-tork sensörü tabanlı kalibrasyon yöntemi kullanılarak 6 serbest dereceli robotun hedef çalışma alanı içindeki maksimum konum hatası 12 mm'den 0,320 mm'ye ve ortalama konum hatası 9 mm'den 0,2771'e optimize etmişlerdir (Joubair ve ark., 2016). Li vd. simülasyon çalışmalarında, 6 serbest dereceli robotun hedef çalışma alanı içindeki konum hatası  $5,35 \pm 2,89$  olarak tespit etmişlerdir (Li ve ark., 2022). Akademik çalışmalarda elde edilen bulgular incelendiğinde robot kollar üzerinde kalibrasyon işlemi yapıldığında konum hatalarının minimize edildiği görülmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada kalibrasyon işlemi yapılmadığı için konum hatası ortalama 10,5 mm olarak tespit edilmiştir. İlerleyen çalışmalarda kalibrasyon işlemi de gerçekleştirilerek kalibrasyon konum hata değerinin minimuma indirilmesi hedeflenmektedir.

#### 4. SONUÇ

Dünyadaki birçok endüstri alanında robot kollar kullanılmaktadır. Robot kolların kullanımı insan gücüyle gerçekleştirilen görevleri kolaylaştırmakta, hız ve maliyet açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca oluşabilecek hatalarda minimuma indirilmektedir. Çalışmada 5+1 serbestlik derecesine sahip robot kol tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan robot kol 3B yazıcı teknolojisi ile imalatı yapılmıştır. İmalatı yapılan robot kolun motor seçimi, sürücü ve kontrolcü seçimi yapılmıştır. Çalışma için gerekli literatür araştırması yapılmış ve gerekli malzemeler temin edilerek robot kolun imalatı gerçekleştirilmiştir. Üretilen robot kol görüntü işleme ve U<sup>2</sup>-Net yapay zekâ yöntemleri kullanılarak üç farklı sınıfa ait nesnelere tespit ederek tespit edilen bir konumdan alarak başka bir tanımlı bir hedef konuma taşıması sağlanmıştır. İmal edilen robot kolda deneysel olarak taşıma, başlangıç, bitiş hareketleri ve hedefe ulaştırma işlemleri başarılı bir biçimde gerçekleştirilmiştir. Ancak çalışmada kullanılan robot kolun kalibrasyon işlemi yapılmadığı için elde edilen konum hatası ortalama olarak 10,5 mm'dir. Elde edilen konum hatası değerini yüksek olmasının temel nedenlerinden birisi üretim aşamasında üç boyutlu yazıcılar kullanarak PLA tipi malzeme kullanılması sonucu hassasiyetin azalmasıdır. İlerleyen çalışmalarda robot kolun metal malzeme ile üretilerek robot kolun hassasiyetinin artırılması hedeflenmektedir. Ayrıca Konum hatalarını

azaltmak için kalibrasyon işleminin yapılması ve kapalı döngü kuvvet torku kontrol yöntemi kullanılması hedeflenmektedir.

## 5. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar arasında, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## 6. YAZAR KATKISI

Bu makale Zekeriya KAYA'nın Bekir AKSOY'un birinci danışmanlığı ve Koray ÖZSOY'un ikinci danışmanlığını hazırlamış olduğu yüksek lisans tezinde üretilmiştir.

## 7. KAYNAKLAR

- Altun Y., Öztürk Z., Özüberk H., Bulanık mantık ve arduino kullanarak step motorun hız kontrolü. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 672-680, 2016.
- ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. Subcommittee F42, Standard Terminology for Additive Manufacturing General Principles—Terminology, ASTM International, 2012.
- Awad A., Goyanes A., Basit A. W., Zidan A. S., Xu C., Li, W., Chen R.K., A Review of State-of-the-Art on Enabling Additive Manufacturing Processes for Precision Medicine. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 145(1), 010802, 2023.
- Ayyıldız M., Çetinkaya K., Predictive modeling of geometric shapes of different objects using image processing and an artificial neural network. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 231(6), 1206-1216, 2017.
- Barutçuoğlu E. I., Robotların Tarihçesi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 2001.
- Berki K., Yapay Sinir Ağları ile Robot Kolu Kontrolü. (Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü), 2013.
- Bilic P., Christ P., Li H. B., Vorontsov E., Ben-Cohen A., Kaissis G., Menze B., The liver tumor segmentation benchmark (lits). *Medical Image Analysis*, 84, 102680, 2023.
- Brambilla C. R., Okafor-Muo O. L., Hassanin H., ElShaer A., 3D printing of oral solid formulations: A systematic review. *Pharmaceutics*, 13(3), 358, 2021.
- Butters L., Xu Z., Klette R., Using machine vision to command a 6-axis robot arm to act on a randomly placed zinc die cast product. *Proceedings of the 2nd International Conference on Control and Computer Vision*, 8-12, 2019.
- Büyükkoçak Y., Görüntü işleme tabanlı aydınlatma ölçüm sistemi tasarımı ve uygulaması. MS thesis. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- Cristalli C., Lattanzi L., Massa D., Angione G. Cognitive robot referencing system for high accuracy manufacturing task. *Procedia Manufacturing*, 11, 405-412, 2017.
- Doğan S., Akar F., Baran A., Geliştirilmiş Sobel Kenar Bulma Operatörünün Farklı Renk Uzaylarındaki Performansının Değerlendirilmesi. *Mühendislikte Güncel Araştırmalar*, 8, 142-153, 2022.

- Elhedda W., Mehri M., Mahjoub M. A., A comparative study of filtering approaches applied to color archival document images. Proceedings of The International Arab Conference on Information Technology (ed M Kherallah), Hammamet, TN, USA, IEEE Explore, 1–8, 2017.
- Grabcad., <https://grabcad.com/library/eklemeli-imalat-yontemiyle-uretilen-alti-eksenli-robot-kol-ile-urunlerin-goruntu-isleme-ve-yapay-zeka-tabanlı-tasniflenmesi-1>, Erişim tarihi 04.04.2023
- Guida R., De Simone M. C., Dašić P., Guida, D., Modeling techniques for kinematic analysis of a six-axis robotic arm. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 568, IOP Publishing, 1-6, 2019.
- Havusoğlu H., Robot kol tasarımı, kinematik analizi ve etkileşimli kontrolü. (Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü), 2014.
- Jhang L. H., Santiago C., Chiu C. S., Multi-sensor based glove control of an industrial mobile robot arm. 2017 International Automatic Control Conference (CACCS), 1-6, IEEE, 2017.
- Joubair A., Zhao L. F., Bigras P., Bonev I. A., Use of a force-torque sensor for self-calibration of a 6-DOF medical robot. Sensors, 16(798), 1-19, 2016.
- Joubair A., Zhao L. F., Bigras P., Bonev I., Absolute accuracy analysis and improvement of a hybrid 6-DOF medical robot. Industrial Robot: An International Journal, 42(1), 44-53, 2015.
- Kayışlı K., Uğur M., 3 Serbestlik Dereceli Bir Robot Kolun Bulanık Mantık ve PID ile Kontrolü. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5(4), 223-234, 2017.
- Küçük S., Bingül Z., Robot kinematics: Forward and inverse kinematics. London, UK: INTECH Open Access Publisher, 4, 117-148, 2006.
- Lattanzi L., Cristalli C., Massa D., Boria S., Lépine P., Pellicciari M., Geometrical calibration of a 6-axis robotic arm for high accuracy manufacturing task. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 111, 1813-1829, 2020.
- Li K., Xu Y., Zhao Z., Meng M. Q. H., External and internal sensor fusion based localization strategy for 6-dof pose estimation of a magnetic capsule robot. IEEE Robotics and Automation Letters, 7(3), 6878-6885, 2022.
- Li L., Haghghi A., Yang Y., A Novel 6-Axis Hybrid Additive-Subtractive Manufacturing Process: Design and Case Studies. Journal of Manufacturing Processes, 33, 150-160, 2018.
- Öğülmüş A. S., Yedi Serbestlik Dereceli iki Küresel Bir Doğrusal Eyleyicili Robot Kolu Sisteminin Tasarımı ve Dinamik Analizi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2022.
- Özsoy K., Aksoy B., Salman O. K. M., Investigation of the dimensional accuracy using image processing techniques in powder bed fusion. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 235(5), 1587-1597, 2021.
- Ramírez I. S., Márquez F. P. G., Papaelias M., Review on additive manufacturing and non-destructive testing. Journal of Manufacturing Systems, 66, 260-286, 2023.
- Russ J. C., Neal F. B., The image processing handbook. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- Sahu S., Choudhury B. B., Biswal B. B., A vibration analysis of a 6axis industrial robot using FEA. Materials Today: Proceedings, 4(2), 2403-2410, 2017.
- Schaler E. W., Wisnowski J., Iwashita Y., Edlund J. A., Sly J. H., Raff, W., Townsend J. A., Two-stage calibration of a 6-axis force-torque sensor for robust operation in the Mars 2020 robot arm. Advanced Robotics, 35(21-22), 1347-1358, 2021.
- Shao J., Zhou K., Cai Y. H., Geng, D. Y., Application of an Improved U<sup>2</sup>-Net Model in Ultrasound Median Neural Image Segmentation. Ultrasound in Medicine & Biology, 48(12), 2512-2520, 2022.

Siemens, Erişim Adresi: [www.siemens.com.tr](http://www.siemens.com.tr) Erişim Tarihi: 01/12/2022.

Talli A., Meti V. K. V., Design, simulation, and analysis of a 6-axis robot using robot visualization software. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 872, 1-9, 2020.

Ye Z., Wei J., Lin Y., Guo Q., Zhang J., Zhang H., Yang K., Extraction of olive crown based on UAV Visible images and the U2-Net deep learning model. Remote Sensing, 14(6), 1523, 2022.

Yılmaz A. Real time security application with image processing using camera. Haliç Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2007.

You N., Han L., Zhu D., Song W. Research on Image Denoising in Edge Detection Based on Wavelet Transform. Applied Sciences, 13(1837), 1-13, 2023.

Zhang Z., Feng S., Almotairy A., Bandari S., Repka M. A., Development of multifunctional drug delivery system via hot-melt extrusion paired with fused deposition modeling 3D printing techniques. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 183(February), 102-111, 2023.

Zhou S., Canchila C., Song W., Deep learning-based crack segmentation for civil infrastructure: data types, architectures, and benchmarked performance. Automation in Construction, 146(February-104678), 1-20, 2023.

**Araştırma Makalesi / Research Article**

**Eş Merkezli İç İçe Borulu Isı Değiştiricisinde GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Su Hibrit Nanoakışkanının Deneysel Analizi**

Emine YAĞIZ GÜRBÜZ

Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Muğla, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5200-8536>, eminegurbuz@mu.edu.tr

**Geliş/ Received:** 01.02.2023;

**Kabul / Accepted:** 03.04.2023

**ÖZET:** Isı değiştiricileri, ısıtma ve soğutma sistemleri gibi birçok endüstriyel uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır. Isı değiştiricilerin ısı performanslarının artırılması için, çalışma akışkanının termofiziksel özelliklerini iyileştirecek nano boyutlu parçacıklar eklenmesi iyi bir çözüm olabilir. Bunun yanında, son yıllarda hibrit nanoakışkanlar olarak bilinen iki veya daha fazla farklı nanopartikül kullanılarak elde edilen nanoakışkanların ısı performanslarında daha yüksek iyileştirme elde edildiği görülmektedir. Bu deneysel çalışmada grafen oksit (GO) – alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/su hibrit nanoakışkanı GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> /su hibrit nanoakışkan kullanılarak, borulu bir ısı değiştiricisinin termal veriminin artırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> /su hibrit nanoakışkanı, ısı değiştiricide iki farklı modda (paralel ve karşıt) olarak denenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kullanılan GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> /su hibrit nanoakışkanının konsantrasyon oranı %1 olarak seçilmiştir. Bu çalışmanın deneysel sonuçları, ısı değiştiricide GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> /su hibrit nanoakışkanının kullanılmasının ısı performansı önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> /su hibrit nanoakışkanının %1 konsantrasyon oranında kullanıldığı sistemde toplam ısı transfer katsayısında paralel ve karşıt akışlı durumda sırasıyla %9.8 ve %10.7 artış değerleri kaydedilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Borulu Isı Değiştirici, Nanoakışkan, Hibrit, GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Isıl Performans.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: eminegurbuz@mu.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Gurbüz Yağız, E. (2023). Eş Merkezli İç İçe Borulu Isı Değiştiricisinde GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Su Hibrit Nanoakışkanının Deneysel Analizi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 211-223.

## Experimental Analysis of GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Water Nanofluid in A Concentric Tube Heat Exchanger

**ABSTRACT:** Heat exchangers are frequently used in many industrial applications such as heating and cooling systems. Increasing the thermal performance of heat exchangers, adding nano-sized particles to enhance thermophysical properties of the working fluid can be a good solution. Moreover, in recent years, it is seen that higher improvement in thermal performance of nanofluids obtained by utilizing two or more nanoparticles known as hybrid nanofluids. In this experimental work, it is aimed to increase the thermal efficiency of a tube heat exchanger by applying graphene oxide (GO) - aluminum oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) /water hybrid nanofluid. In this context, GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water hybrid nanofluid was tested in two different modes (parallel flow and cross flow) in the tubular heat exchanger and the results were compared. The concentration ratio of the GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water hybrid nanofluid was chosen as 1%. The experimental results of this study proved that utilization of GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water hybrid nanofluid in the heat exchanger significantly improved the thermal performance. In the system that GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water hybrid nanofluid was used at 1% concentration, as increase of 9.8% and 10.7% were recorded in the total heat transfer coefficient in parallel and counter flow, respectively.

**Keywords:** Tubular Heat Exchanger, Nanofluid, Hybrid, GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Thermal Performance.

### 1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun gittikçe artması ve kaynakların bilinçsizce tüketilmesi küresel enerji ihtiyacının her geçen gün artışına neden olmaktadır. Bu durum ile ilişkili olarak fosil kaynakların sınırlılığı ve sera gazı emisyonlarının önemli artışı daha verimli enerji dönüşüm sistemleri kullanılmasına ihtiyaç doğurmaktadır. Enerji dönüşüm sistemleri ile ilgili endüstride sıklıkla tercih edilen cihazlar ısı değiştiricileridir. Isı değiştiricilerinde önemli olan faktör ise gerçekleştirilebilecek etkin ısı transferidir (Afshari ve ark., 2017; Afshari ve ark., 2018; Aytac ve ark., 2023; Variyenli ve ark., 2023). Farklı alanlarda, çeşitli özelliklere sahip ısı eşanjörleri kullanılmaktadır. Bu farklı ısı değiştiriciler aynı zamanda ısı performansını arttırmak amacıyla farklı yöntemleri de gerektirmektedir. Isı değiştiricilerde etkinliğin artışı, ısı değiştirici sisteminde yapısal değişikliğe gidilmesi ya da çalışma akışkanının değiştirilmesi ile sağlanabilir (Göлтаş ve ark., 2022). Literatüre bakıldığında yapısal değişikliğin ön plana çıkarıldığı pek çok çalışma bulunmaktadır (Gürel ve ark., 2020; Gürel ve ark., 2022). Bunun yanında çalışma akışkanının değiştirilmesi yöntemi ise, diğer yöntemlere göre daha yenidir.

Çalışma akışkanının değiştirilmesi yönteminde, baz çalışma akışkanı içerisine belirli oranda nanopartikül parçacıklar eklenerek nanoakışkan çözeltisi elde edilir (Khanlari ve ark., 2018; Gürbüz ve ark., 2022). Nanoakışkan çözeltisi kullanılarak termal iletkenliğin artırılması kavramı, literatüre ilk olarak Choi ve Eastman (1995) tarafından yapılan çalışma ile girmiştir. Yapılan araştırma, metalik veya metalik olmayan nanoparçacıkların su veya yağ gibi bir çalışma sıvısına eklenmesi ile çalışma akışkanlarının termofiziksel özelliklerinin arttırabileceği prensibini savunmaktadır. Bu önerme ile ilgili olarak başlıca iki sebep gösterilmektedir. Birinci sebep, nanopartiküllerin baz sıvıya kıyasla daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olmasından kaynaklanmaktadır. İkinci sebep ise, baz sıvıya nanoparçacıkların eklenmesi ile termal transfer yüzey alanının artırılması ile sağlanmaktadır. Bunun yanında, nanopartiküllerin kullanılması, çalışma akışkanının etkin ısı kapasitesini de arttırmış olacaktır. Ayrıca yapılan çalışmalarda nanopartiküller, nanoakışkanının ısı iletkenliğini etkileyen ana parametre olan akışkan aktivitesinde ve türbülans şiddetinde artışı sağlayacaktır (Afshari ve Muratçobanoğlu 2022; Tuncer ve ark., 2023). Nanoparçacık boyutu, şekli ve konstrasyonu,

nanoakışkan özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerdir (Avramenko ve ark., 2014; Avramenko ve ark., 2018).

Literatürde nanoakışkanların borulu ısı değiştirici ile kullanımı üzerine çok çeşitli çalışmalar mevcuttur. Sonawane ve diğerleri (2013) bir borulu ısı değiştiricisinde farklı parçacık konsantrasyonlarında alüminyum oksit/su ( $Al_2O_3/su$ ) nanoakışkan çözeltilerinin ısı transfer davranışlarını analiz etmiştir. Deneysel sonuçlar, artan nanoparçacık konsantrasyonunun, özellikle yüksek Reynolds (Re) sayılarında ısı transferinde iyileşmeye yol açtığını göstermiştir. Aynı şekilde Prasad ve Gupta (2016) farklı konsantrasyonlarda  $Al_2O_3/su$  nanoakışkan çözeltisinin termal verimliliğini borulu ısı değiştiricisinde deneysel olarak incelemiştir. Araştırma sonuçlarında  $Al_2O_3/su$  nanoakışkan çözeltisi kullanılarak Nusselt sayısında maksimum %31.28 bir artış elde edilebileceği elde edilmiştir. Başka bir çalışmada Darzi ve diğerleri (2013), 5000-20000 Re sayılarında borulu bir ısı değiştiricisinde  $Al_2O_3$ -su nanoakışkan kullanımı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Sonuçlarda,  $Al_2O_3$ -su nanoakışkan kullanımının, ısı değiştiricinin ısı performansını önemli ölçüde geliştirdiği bulunmuştur. Başka bir çalışmada ise Sadeghinezhad ve diğerleri (2015), grafen nano plaka (GNP) partikülleri /su nanoakışkanı dört farklı oranda (% 0.025, %0.05, %0.075, %0.1) partikül oranı ile incelenmiştir. Kullanılan nanoakışkan çözeltilerinin ısı verimliliği %7.96-%25 oranında arttığı bulunmuştur.

Nanoakışkanların ısı performansını, hibrit nanoakışkanlar olarak bilinen iki veya daha fazla farklı parçacık kullanılarak da yükseltilebilir. Yalnızca tek çeşit nanopartikül kullanımı, çalışma akışkanından istenen tüm özellikleri sağlayamadığında bu yöntem başvurulabilir. Bu nedenle, hibrit nanoakışkanlar birleşik özellikleri ile gelişmiş termal davranış için uygun görülmektedir (Sajid ve Ali, 2018). Bazı araştırmacılar, hibrit nanoakışkanların tekli nanoparçacık içeren nanoakışkanlara göre daha iyi termal davranış gösterdiklerini de belirtmişlerdir (Bahiraei ve ark., 2017; Bahiraei ve ark., 2018; Khanlari 2020a; Tuncer ve ark.,2023).

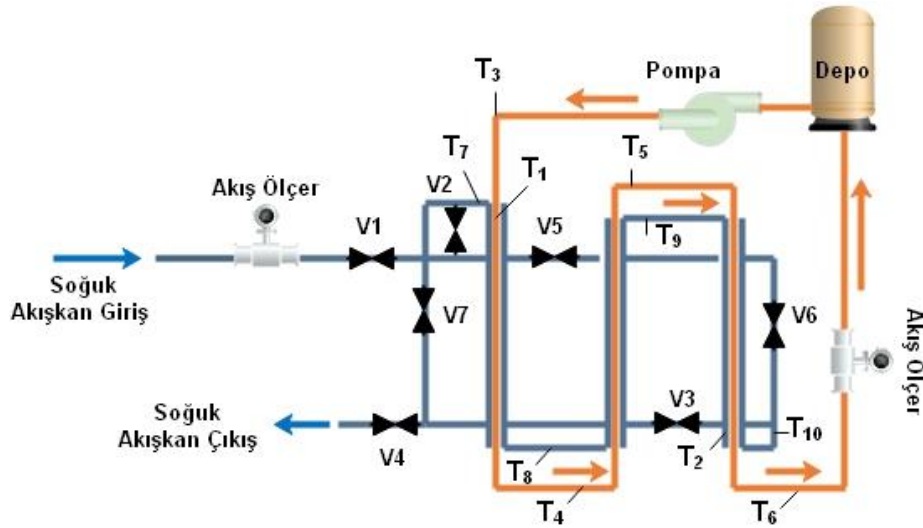
Bu çalışmada, eş merkezli iç içe borulu bir ısı değiştiricisinde saf su ve grafen oksit (GO)-alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ )/su hibrit nanoakışkanı paralel ve karşıt akışlı olmak üzere farklı koşulda denenmiştir. Hibrit nanoakışkan ağırlıkça %1 partikül konsantrasyonunda hazırlanmış ve sonuçlar saf su ile karşılaştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Deneysel Çalışma

Bu çalışmada, GO- $Al_2O_3/su$  hibrit tip nanoakışkan kullanmanın ısı performans üzerindeki etkisini incelemek için eş merkezli iç içe borulu bir ısı değiştiricisi kullanılmıştır. Deney düzeneğinin ısı değiştiricisi bölümünde Şekil 1'de görüldüğü gibi iç boru üzerinden sıcak akışkan, dış boru üzerinden ise soğuk akışkan geçmektedir. Sistemde kullanılan elektrikli ısıtıcının gücü 3 kW'dır. Deney düzeneğinde aynı zamanda devre kesiciler ve basınç valfleri gibi bazı güvenlik önlemleri de alınmıştır. Bunun yanında sıcak ve soğuk akışkan debilerinin yapılabilmesi için iki adet akış ölçer bulunmaktadır. Farklı noktalarda olmak üzere 10 adet termokupla yer verilmiştir.

Sistem çalışmasında, sıcak akışkan bir depo içerisinde ısıtılır ve ısı değiştiricinin iç tarafından akması sağlanır. Soğuk akışkan ise, ısı değiştiricisinin dış tarafından akar ve sistemden dışarı çıkarılır. Sistemde hibrit GO- $Al_2O_3$  nanoakışkanı, ısı değiştiricisinin sıcak çevriminin olduğu tarafında test edilmiştir. Sistemin soğuk tarafında ise saf su kullanılmıştır. Sıcak taraftaki yüzey alanı  $0.026 m^2$ , soğuk taraftaki yüzey alanı ise  $0.031 m^2$  olarak ölçülmüştür. Akış yönünün etkisinin de gösterilebilmesi için ısı değiştirici için paralel ve karşıt akış olmak üzere iki farklı koşulda denemesi yapılmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

## 2.2. Nanoakışkan Çözeltisinin Hazırlanması

Bu deneysel çalışmada hibrit nanoakışkan elde etmek için iki farklı nanoparçacık kullanılmıştır. Bu bağlamda ısıl performansı yükseltmek amacıyla  $Al_2O_3$  nanopartikülleri GO nanopartikülleri ile karıştırılarak hibrit nanoakışkan elde edilmiştir. İlk olarak kullanılan partikül boyutunu küçültmek ve homojen bir partikül elde edebilmek için Spex-8000 kullanılarak bilyeli öğütme tekniği ile 6 saat süreyle öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki aşamada hazırlanan nanopartikül saf suya %1 ağırlık oranında ilave edilmiştir. Ayrıca  $Al_2O_3$ -GO/saf su nanoakışkanının çökmesini önlemek ve kararlılığını arttırmak için nanoakışkan çözeltilerine Triton X-100 yüzey aktifleştirici madde eklenmesi yapılmıştır. Son olarak, hazırlanan nanoakışkan solüsyonları daha kararlı ve homojen solüsyonlar elde edebilmek için, ultrasonik banyoda 3 saat süre ile bekletilmiştir.



Şekil 2. Nanoakışkan çözeltisine uygulanan ultrasonik banyo işlemi

## 2.3. Kullanılan Hesaplamalar

Bu bölümde deneysel olarak elde edilen verilerin analizinde kullanılan eşitlikler gösterilmiştir. Termal analizde kullanılabilmesi için öncelikle hazırlanan nanoakışkanların partikül hacim konsantrasyonunun ( $\emptyset$ ) bir fonksiyonu olarak termodinamik özelliklerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu bağlamda, nanoakışkanın yoğunluğu Eşitlik 1. kullanılarak elde edilebilir (Khairul et al.,2014).

$$\rho_{na} = \emptyset\rho_p + (1 - \emptyset)\rho_{bs} \quad (1)$$



Yukarıdaki denklemde,  $\rho_{na}$ ,  $\rho_p$  ve  $\rho_{bs}$  sırasıyla nanoakışkan, kullanılan nanopartikül ve baz sıvısı için yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ ) değerlerini göstermektedir. Ayrıca hesaplamalarda önemli bir parametre olan nanoakışkan çözeltisinin özgül kapasitesinin hesaplama eşitliği şu şekilde verilebilir:

$$c_{p,na} = \emptyset c_{p,p} - (1 - \emptyset) c_{p,bs} \quad (2)$$

Eşitlik 2. de  $c_{p,na}$ ,  $c_{p,p}$  ve  $c_{p,bs}$  sırasıyla nanoakışkan, kullanılan nanopartikül ve baz sıvısı için özgül kapasite ( $\text{kJ/kg.K}$ ) değerlerini göstermektedir. Nanoakışkanın termal iletkenliği, nanoparçacık konsantrasyonun ( $\emptyset$ ) bir fonksiyonu olarak Eşitlik 3. ile ifade edilebilir.

$$k_{na} = k_{bs} \left[ \frac{k_p + 2k_{bs} + 2\emptyset(k_p - k_{bs})}{k_p + 2k_{bs} - 2\emptyset(k_p - k_{bs})} \right] \quad (3)$$

Eşitlik 3. de  $k_{na}$ ,  $k_p$  ve  $k_{bs}$  sırasıyla nanoakışkan, kullanılan nanopartikül ve baz sıvısı için termal iletkenlik ( $\text{W/mK}$ ) değerlerini göstermektedir. Son olarak, hazırlanan nanoakışkan çözeltisinin vizkozitesi şu şekilde hesaplanabilir:

$$\mu_{na} = \mu_{bs} (1 + 2.5 \emptyset) \quad (4)$$

Akışkanlar arasındaki enerji transferi, soğuk taraf enerjisi ( $\dot{Q}_{soğuk akışkan}$ ) ve sıcak taraf enerjisi ( $\dot{Q}_{sıcak akışkan}$ ) ile tanımlanabilir. Sıcak taraftan soğuk tarafa aktarılan termal enerji Eşitlik 5. ile hesaplanabilir. Sıcak tarafta kullanılan özgül ısı kapasitesi ( $c_{p,sıcak akışkan}$ ) ortalama değer olarak hesaplamalar katılmıştır.

$$\dot{Q}_{sıcak akışkan} = \dot{m}_{sıcak akışkan} \cdot c_{p,sıcak akışkan} \cdot (T_3 - T_6) \quad (5)$$

Bu transfer işlemi ile ilgili olarak soğuk taraftan kazanılan ısı ( $\dot{Q}_{soğuk akışkan}$ ) ise Eşitlik 6. da verilmiştir. Bu tarafta da özgül ısı kapasitesi olarak ( $c_{p,soğuk akışkan}$ ) ortalama değer alınarak, hesaplamalar yapılmıştır.

$$\dot{Q}_{soğuk akışkan} = \dot{m}_{soğuk akışkan} \cdot c_{p,soğuk akışkan} \cdot (T_7 - T_{10}) \quad (6)$$

Yukarıda bahsedildiği gibi ısı değiştiricilerin genel prensibine göre maksimum verimin elde edildiği varsayımı ile sıcak taraftaki ısı transferi, soğuk taraftaki ısı transferine eşit kabul edilmektedir. Ancak bu durumda ısı transfer yüzeyinde meydana gelen kayıplar ve ölçüm hataları ihmal edilmektedir. Bu durum göz önüne alındığında, deneysel çalışmanın güvenilirliğinin artırılması amacıyla sistemin en iyi şekilde yalıtılmasına oldukça dikkat edilmiştir.

$$\dot{Q}_{sıcak akışkan} = \dot{Q}_{soğuk akışkan} \quad (7)$$

Isı değiştiriciden geçen sıcak ve soğuk akışkan arasındaki ısı transferi ( $\dot{Q}$ ), ısı değiştiricinin iç yüzey alanı ( $A_{yüzey}$ ), çalışma akışkanı ile ısı değiştiricinin iç yüzeyi arasındaki taşınım katsayısını ( $h_{ca}$ ) ve logaritmik sıcaklık farkı ( $\Delta T_{ln}$ ) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\dot{Q} = h_{ca} \cdot A_{yüzey} \cdot \Delta T_{ln} \quad (8)$$

Logaritmik sıcaklık farkı ( $\Delta T_{ln}$ ) şu şekilde yapılabilir:

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_{iç} - \Delta T_{dış}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{iç}}{\Delta T_{dış}}\right)} \quad (9)$$

Sıcak taraftan aktarılan ısı enerjisi ( $\dot{Q}_{sıcak akışkan}$ ) Eşitlik 9. daki logaritmik sıcaklık farkı kullanılarak şu şekilde elde edilebilir:

$$\dot{Q}_{sıcak akışkan} = \frac{h_{sıcak akışkan} \cdot A_{iç} [(T_3 - T_1) - (T_6 - T_2)]}{\ln\left(\frac{T_3 - T_1}{T_6 - T_2}\right)} \quad (10)$$

Sistemin sıcak tarafındaki ısı transfer katsayısı değeri, Eşitlik 10. kullanılarak elde edilebilir. Bu denkleme benzer şekilde, sistemin soğuk tarafındaki ısı transfer katsayısını hesaplamak için Eşitlik 11. kullanılabilir.

$$\dot{Q}_{soğuk akışkan} = \frac{h_{soğuk akışkan} \cdot A_{dış} [(T_1 - T_7) - (T_2 - T_{10})]}{\ln\left(\frac{T_1 - T_7}{T_2 - T_{10}}\right)} \quad (11)$$

Son olarak, Eşitlik 12. ile ısı değiştirici ile genel ısı transfer katsayısını elde etmek mümkündür (Khanlari et al., 2020b).

$$\dot{Q}_{sıcak akışkan} = A_{toplam} U \left[ \frac{[(T_3 - T_7) - (T_6 - T_{10})]}{\ln\left(\frac{T_3 - T_7}{T_6 - T_{10}}\right)} \right] \quad (12)$$

Isı değiştiriciler ile ilgili başka bir önemli konu ise, genellikle etkinlik olarak adlandırılan  $\varepsilon$  terimidir. Isı değiştiricisinin etkinliği ( $\varepsilon$ ) Eşitlik 13. ile elde edilebilir.

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{maksimum}} = \frac{C_{sıcak akışkan} (T_{sıcak,giris} - T_{sıcak,cıkis})}{C_{minimum} (T_{sıcak,giris} - T_{soğuk,giris})} = \frac{C_{soğuk akışkan} (T_{soğuk,cıkis} - T_{soğuk,giris})}{C_{minimum} (T_{sıcak,giris} - T_{soğuk,giris})} \quad (13)$$

Yukarıdaki eşitlikte verilen sıcak akışkan ısı kapasitesi oranı ( $C_{sıcak akışkan}$ ) ve soğuk akışkan ısı kapasitesi oranı ( $C_{soğuk akışkan}$ ) değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$C_{sıcak akışkan} = \dot{m}_{sıcak akışkan} \cdot c_{p,sıcak akışkan} \quad (14)$$

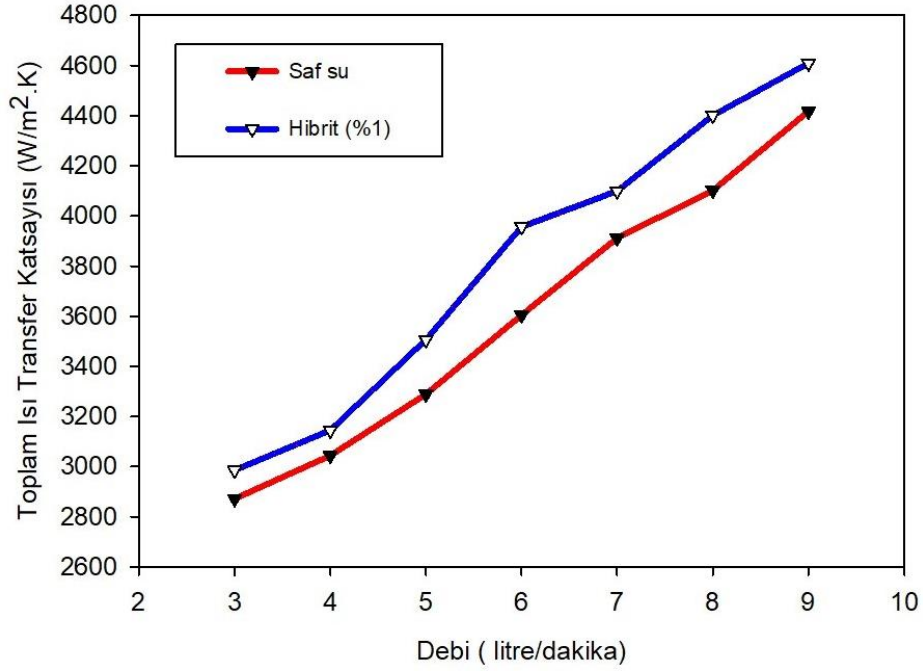
$$C_{soğuk akışkan} = \dot{m}_{soğuk akışkan} \cdot c_{p,soğuk akışkan} \quad (15)$$

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, saf su ve hibrit nanoakışkanın (GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su) eş merkezli iç içe borulu bir ısı değiştiricisinde farklı debilerde test edilmesinin deneysel sonuçları verilmiş ve ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Materyal ve yöntem bölümünde belirtildiği gibi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve GO nanoparçacıkları mekanik olarak karıştırıldıktan sonra saf suya katılarak hibrit tip nanoakışkanlar elde edilmiştir.

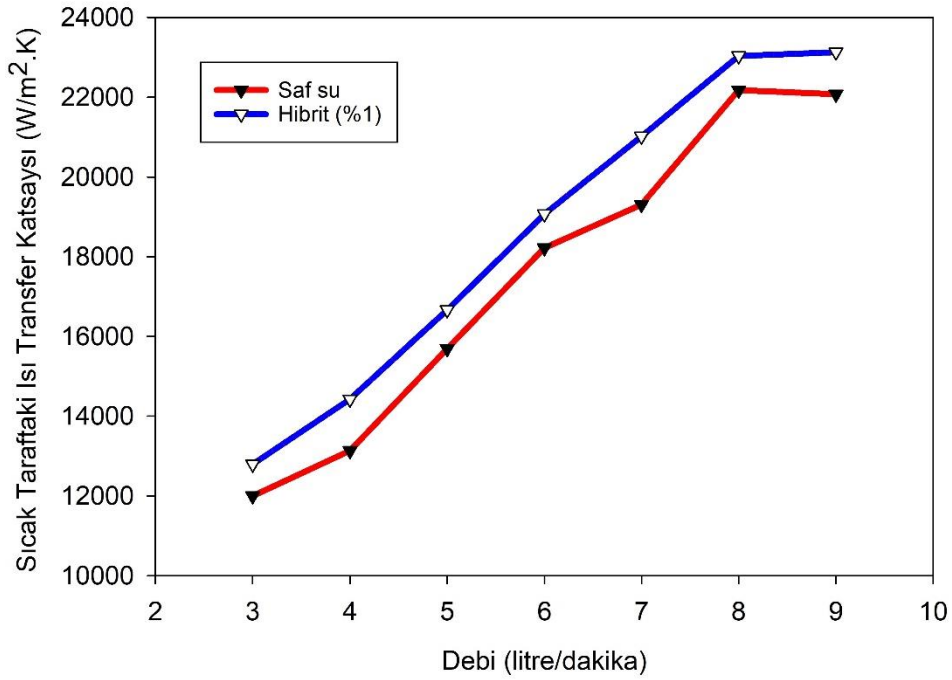
Toplam ısı transfer katsayısı, iç içe borulu bir ısı değiştiricisinde ısı performansının analizinde önemli bir göstergedir. Şekil 3 sıcak çalışma sıvısının debisine göre paralel akışlı durumdaki toplam ısı transfer katsayısındaki değişimi göstermektedir. Bununla birlikte, %1 ağırlık oranında GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkan kullanıldığında, paralel akışlı durumda toplam ısı transfer katsayısında

maksimum % 9.8 artış 6 litre/dakika değerinde elde edilmiştir. Toplam ısı transferinde ortalama artış ise %5.7 olarak bulunmuştur.



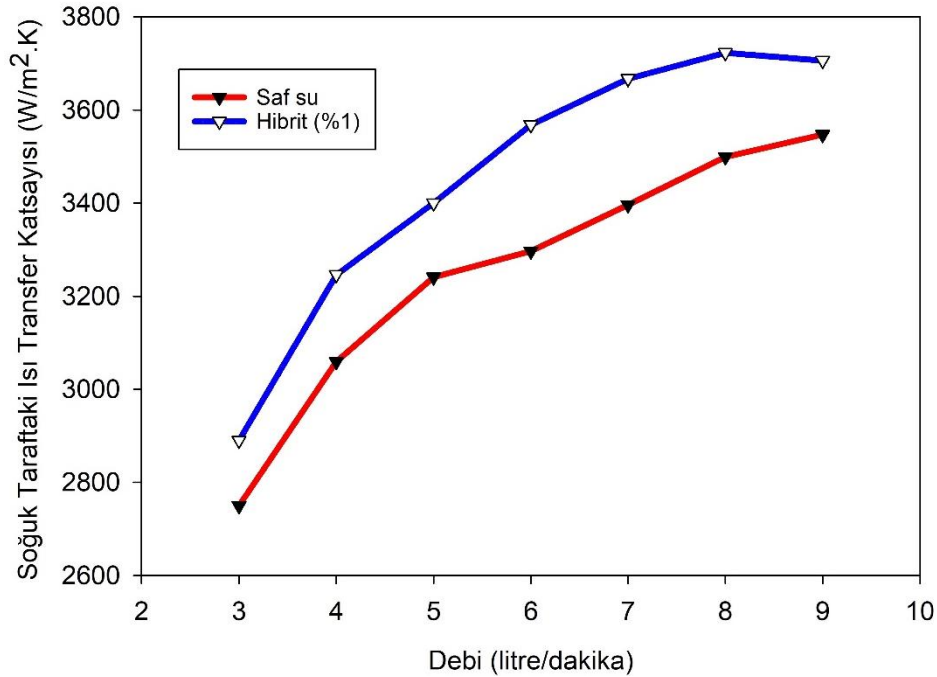
**Şekil 3.** Toplam ısı transfer katsayısının debiye göre farklı çalışma akışkanları için değişimi (paralel akış)

Eş merkezli iç içe borulu ısı değiştiricinin ısıl performansının değerlendirilmesinde diğer önemli parametreler, paralel akış durumunda sıcak ve soğuk taraftaki ısı transferi katsayısı değerleridir. Şekil 4 sıcak çalışma sıvısının debisine göre paralel akışlı durumdaki sıcak taraftaki ısı transfer katsayısındaki değişimi göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi sıcak tarafta hibrit nanoakışkan kullanımı ısı transfer katsayısında saf su ile karşılaştırıldığında tüm debilerde artışa sebep olmuştur. Sonuçlar incelendiğinde %1 ağırlık oranında GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkan kullanıldığında, paralel akışlı durumda sıcak tarafın ısı transfer katsayısında maksimum % 10.8 artış 4 litre/dakika değerinde elde edilmiştir. Paralel akışlı durumda sıcak tarafın ısı transfer katsayısında ortalama artış ise %6.4 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4. Sıcak taraftaki ısı transfer katsayısının debiye göre farklı çalışma akışkanları için değişimi (paralel akış)

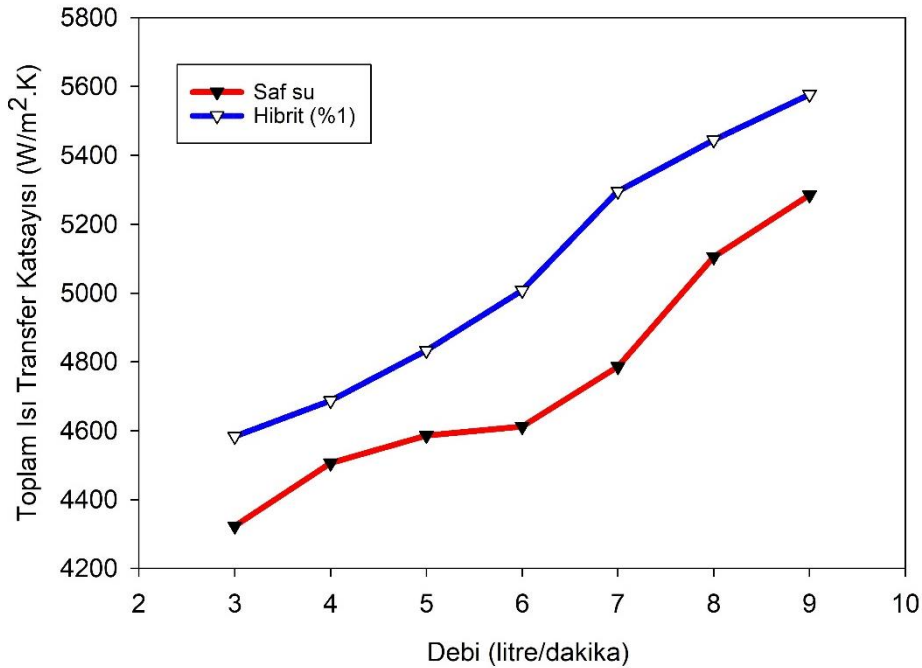
Şekil 5 sıcak çalışma sıvısının debisine göre paralel akışlı durumdaki soğuk taraftaki ısı transfer katsayısındaki değişim değerlerini vermektedir. Daha önceki şekillere benzer şekilde, hibrit nanoakışkan ile saf su karşılaştırıldığında soğuk tarafta ısı transfer katsayısında tüm debilerde belirgin bir yükseliş görülmektedir. %1 ağırlık oranında GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkan kullanıldığında, paralel akışlı durumda soğuk tarafın ısı transfer katsayısında özellikle 6 litre/dakika değerinde % 8.2 artış ile maksimum artış değerini vermektedir. Paralel akışlı durumda soğuk tarafın ısı transfer katsayısında ortalama artış ise %6.1 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5. Soğuk taraftaki ısı transfer katsayısının debiye göre farklı çalışma akışkanları için değişimi (paralel akış)

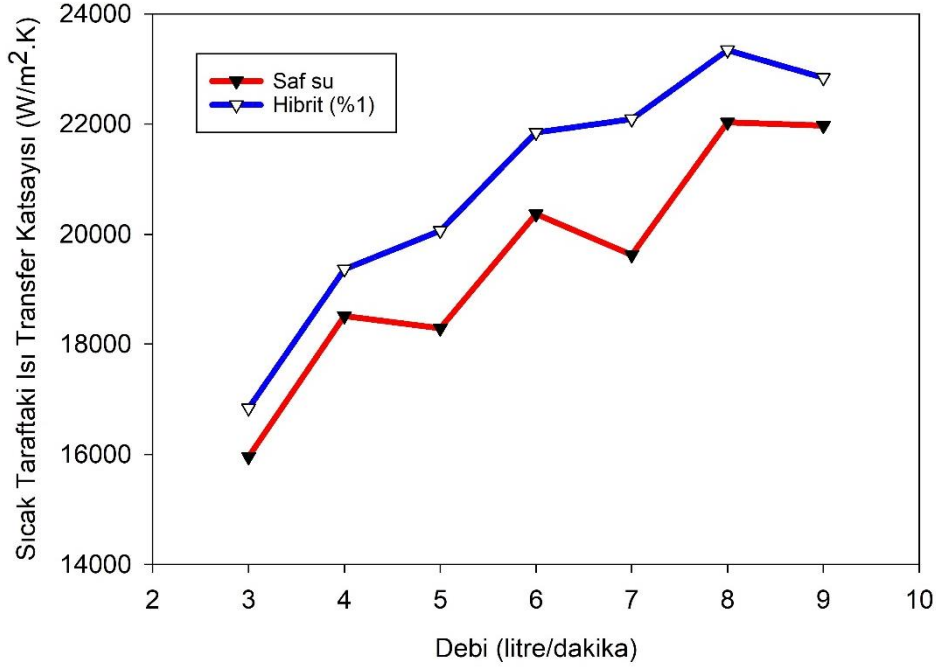
Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere borulu ısı değiştirici sistemi paralel ve karşıt akış olmak üzere iki farklı modda incelenmiştir. Şekil 6 sıcak çalışma sıvısının debisine göre karşıt akışlı durumdaki toplam ısı transfer katsayısındaki değişimi göstermektedir. Öncelikle karşıt akışta elde edilen toplam ısı transfer katsayısı değerlerinin paralel akışa göre oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Daha yüksek akış hızlarında bu toplam ısı transfer katsayısı değerleri daha da artış göstermiştir. Karşıt akışlı durumda %1 ağırlık oranında GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkanı kullanıldığında toplam ısı transfer katsayısında maksimum % 10.7 artış 7 litre/dakika değerinde elde edilmiştir. Toplam ısı transferinde ortalama artış ise karşıt yönlü akışta % 6.7 olarak bulunmuştur. Deneysel sonuçlar, saf suya hibrit nanoparçacık eklenmesinin toplam ısı transfer katsayısını kesinlikle arttırdığını kanıtlamıştır.

Şekil 7 sıcak akışkanın debisine göre karşıt akışlı durumdaki sıcak tarafın ısı transfer katsayısının değişimini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi sıcak tarafta nanoakışkan kullanımı saf suya oranla ısı transfer katsayısında tüm debi değerlerinde artışı sağlamıştır. Aynı zamanda incelenen durumda saf suyun sıcak taraftaki ısı transfer katsayısında dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Dolayısıyla karşıt akışta hibrit nanoakışkan kullanıldığında, sıcak taraftaki ısı transfer katsayısı daha dengeli çıktığı sonucuna ulaşılabılır. Sıcak akışkanın debisine göre karşıt akışlı durumda sıcak tarafın ısı transfer katsayısında maksimum artışın 7 litre/dakika debi değerinde %12.6 olarak gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır. Aynı zamanda, karşıt akış durumunda sıcak tarafın ısı transfer katsayısında ortalama artışın % 7 olduğu bulunmuştur.

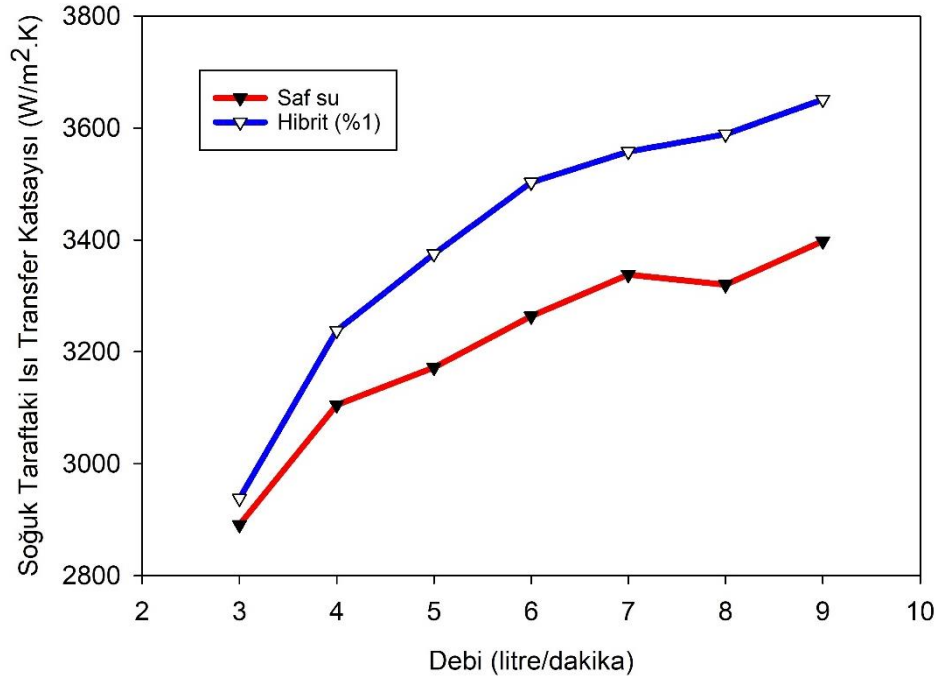


Şekil 6. Toplam ısı transfer katsayısının debiye göre farklı çalışma akışkanları için değişimi (karşıt akış)

Şekil 8 aynı şekilde sıcak akışkanın debisine göre karşıt akışlı durumdaki soğuk tarafın ısı transfer katsayısının değişimini belirtmektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında, sıcak akışkanın debisine göre karşıt akışlı durumda soğuk tarafın ısı transfer katsayısında maksimum artışın 8 litre/dakika debi değerinde %8.1 olarak gerçekleştiğidir. Ortalama artış değeri ise % 6 değerine yakın elde edilmiştir.



Şekil 7. Sıcak taraftaki ısı transfer katsayısının debiye göre farklı çalışma akışkanları için değişimi (karşıt akış)



Şekil 8. Soğuk taraftaki ısı transfer katsayısının debiye göre farklı çalışma akışkanları için değişimi (karşıt akış)

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, ısıl verimin artışı sağlayabilmek için bir eş merkezli iç içe borulu ısı değiştiricisinde saf su ve GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su hibrit nanoakışkan kullanılmış ve elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Deneyler, GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su hibrit nanoakışkanının davranışını göstermek için paralel ve karşıt akışlı olmak üzere iki şekilde çalıştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışma şu sonuçları vermiştir:

- %1 ağırlık oranında GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkan kullanıldığında, sırasıyla paralel ve karşıt akışlı durumda toplam ısı transfer katsayısında maksimum % 9.8 ve % 10.7 artış elde edilmiştir.
- İncelenen tüm değişkenlerde, paralel ya da karşıt modda çalıştırılması ayırt etmeden %1 ağırlık oranında GO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/su nanoakışkan kullanımında saf suya göre daha yüksek değerler alındığı görülmüştür.
- Çalışmadan elde edilen bulgular, hibrit tip nanoakışkan kullanımının saf suya oranla belirgin anlamda olumlu etkiler yarattığını göstermiştir. Bu olumlu etkiler ilerleyen çalışmalarda, farklı konsantrasyon oranlarında nanoakışkan çözeltileri kullanılarak da denenebilir.
- Gelecekteki çalışmalarda, farklı parçacık oranlarına sahip farklı tip nanoakışkanlar iç içe merkezli borulu ısı değiştiricisinde test edilebilir. Çünkü farklı nanokışkanlar aynı sistem içerisinde farklı davranışları temsil edebilirler.

## 5. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## 6. YAZAR KATKISI

Çalışmanın tüm süreçleri yazar tarafından gerçekleştirilmiştir.

## 7. KAYNAKLAR

- Afshari F., Comakli O., Karagoz S., Zavaragh H. G., A thermodynamic comparison between heat pump and refrigeration device using several refrigerants. *Energy and Buildings*, 168, 272-283,2018.
- Afshari F., Comakli O., Lesani A., Karagoz S., Characterization of lubricating oil effects on the performance of reciprocating compressors in air–water heat pumps. *International Journal of Refrigeration*, 74, 505-516,2017.
- Afshari F., Muratçobanoğlu B., Thermal analysis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/water nanofluid in spiral and serpentine mini channels by using experimental and theoretical models. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-16,2022.
- Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Moskalenko A. A., Lohvynenko P. N., Kovetska Y. Y., Instability of a vapor layer on a vertical surface at presence of nanoparticles. *Applied Thermal Engineering*, 139, 87-98,2018.
- Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Tyrinov A. I., Blinov D. G., Heat transfer at film condensation of stationary vapor with nanoparticles near a vertical plate. *Applied Thermal Engineering*, 73(1), 391-398,2014.
- Aytaç İ., Tuncer A. D., Khanlari A., Variyenli H. İ., Mantıcı S., Güngör L., Ünvar S., Investigating the effects of using MgO-CuO/water hybrid nanofluid in an evacuated solar water collector: A comprehensive survey. *Thermal Science and Engineering Progress*, 101688,2023.
- Bahiraei M., Berahmand M., Shahsavari A., Irreversibility analysis for flow of a non-Newtonian hybrid nanofluid containing coated CNT/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles in a minichannel heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 125, 1083-1093,2017.

- Bahiraee M., Rahmani R., Yaghoobi A., Khodabandeh E., Mashayekhi R., Amani M., Recent research contributions concerning use of nanofluids in heat exchangers: a critical review. *Applied Thermal Engineering*, 133, 137-159,2018.
- Choi S. U., Eastman J. A., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles (No. ANL/MSD/CP-84938; CONF-951135-29). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States),1995.
- Darzi A. R., Farhadi M., Sedighi K., Heat transfer and flow characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–water nanofluid in a double tube heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 47, 105-112,2013.
- Göлтаş M., Gürel B., Keçebaş A., Akkaya V. R., Güler O. V., Kurtuluş K., Gürbüz E. Y., Thermo-hydraulic performance improvement with nanofluids of a fish-gill-inspired plate heat exchanger. *Energy*, 253, 124207,2022.
- Gürbüz E. Y., Keçebaş A., Sözen A., Exergy and thermoeconomic analyses of the diffusion absorption refrigeration system with various nanoparticles and their different ratios as work fluid. *Energy*, 248, 123579,2022.
- Gürel B., Akkaya V. R., Göлтаş M., Şen Ç. N., Güler O. V., Koşar M. İ., Keçebaş A., Investigation on flow and heat transfer of compact brazed plate heat exchanger with lung pattern. *Applied Thermal Engineering*, 175, 115309,2020.
- Gürel B., Keçebaş A., Akkaya V. R., Göлтаş M., Güler O. V., Kurtuluş K., Modeling and Assessment of the Thermo-Hydraulic Performance for a Fish Gill Patterned Plate Heat Exchanger in Biomimetic Approach. *Heat Transfer Engineering*, 1-15,2022.
- Khairul M. A., Alim M. A., Mahbulul I. M., Saidur R., Hepbasli A., Hossain, A., Heat transfer performance and exergy analyses of a corrugated plate heat exchanger using metal oxide nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 50, 8-14,2014.
- Khanlari A., Sözen A., Variyenl, H. İ., Simulation and experimental analysis of heat transfer characteristics in the plate type heat exchangers using TiO<sub>2</sub>/water nanofluid. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*,2018.
- Khanlari A., Yılmaz Aydın, D., Sözen A., Gürü M., Variyenli, H. İ., Investigation of the influences of kaolin-deionized water nanofluid on the thermal behavior of concentric type heat exchanger. *Heat and Mass Transfer*, 56, 1453-1462,2020b.
- Khanlari A.,The effect of utilizing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>/Deionized water hybrid nanofluid in a tube-type heat exchanger. *Heat Transfer Research*, 51(11), 991-1005,2020a.
- Prasad P. D., Gupta A. V. S. S. K. S., Experimental investigation on enhancement of heat transfer using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid in a u-tube with twisted tape inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 75, 154-161,2016.
- Sadeghinezhad E., Togun H., Mehrali M., Nejad P. S., Latibari S. T., Abdulrazzaq T., Kazi S.N., Metselaar H. S. C., An experimental and numerical investigation of heat transfer enhancement for graphene nanoplatelets nanofluids in turbulent flow conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81, 41-51,2015.
- Sajid M. U., Ali H. M., Thermal conductivity of hybrid nanofluids: a critical review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126, 211-234,2018.
- Sonawane S. S., Khedkar R. S., Wasewar K. L., Study on concentric tube heat exchanger heat transfer performance using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–water based nanofluids. *International communications in heat and mass transfer*, 49, 60-68,2013.



- Tuncer A. D., Khanlari A., Afshari F., Sözen A., Çiftçi E., Kusun B., Şahinkesen İ., Experimental and numerical analysis of a grooved hybrid photovoltaic-thermal solar drying system. *Applied Thermal Engineering*, 218, 119288,2023.
- Tuncer A. D., Khanlari A., Sözen, A., Gürbüz E. Y., Variyenli H. İ., Upgrading the performance of shell and helically coiled heat exchangers with new flow path by using TiO<sub>2</sub>/water and CuO–TiO<sub>2</sub>/water nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 183, 107831,2023.
- Variyenli H. İ., Amini A., Tuncer A. D., Khanlari A., Kolay Ş., Experimental and numerical analysis of a helically-coiled solar water collector at various angular placements. *International Journal of Thermal Sciences*, 188, 108177,2023.

---

Araştırma Makalesi / Research Article

---

**Thermomechanical Response of Functionally Graded Ti-6Al-4V and Zirconia Biomaterial Plates**

Ramazan ÖZMEN

Karabük University, Engineering Faculty, Mechatronics Engineering Department, Karabük, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6020-8538>, ramazanozmen@karabuk.edu.tr

Geliş/ Received: 06.03.2023;

Kabul / Accepted: 04.04.2023

**ABSTRACT:** This article studies the free vibration and thermal buckling responses of functionally graded material (FGM) porous nanoplates exposed to thermal load. The developed mathematical model includes a shear deformation, size-scale, and microstructure influence by a high-order shear deformation and nonlocal strain gradient theories. The study considers four different porosity patterns across the thickness: uniform, symmetrical, asymmetric bottom, and asymmetric top distributions. The equation of motion of the FGM porous nanoplate, including the effects of thermal load, was derived with Hamilton's principle, and then solved analytically by employing the Navier method. Especially the temperature-dependent material properties of Ti-6Al-4V and Zirconia are involved in the model in calculating thermal loads due to their effectiveness in the dynamic behavior of the nanoplate. For the free vibration responses of the nanoplate, the effects of nonlocal and strain gradient elasticities, temperature rise, porosity volume fraction and its distribution have been analyzed. The results reveal significant influences of porosity and its distribution pattern, material's volumetric dispersion, size dependency, and temperature on the plate's free vibration and buckling temperatures.

**Keywords:** Porosity, Functionally Graded Material, Nanoplate, Nonlocal strain gradient theory, Thermal load.

---

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: ramazanozmen@karabuk.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Özmen, R. (2023). Thermomechanical Response of Functionally Graded Ti-6Al-4V and Zirconia Biomaterial Plates. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 224-243.

## 1. INTRODUCTION

Many diverse types of engineering structures frequently employ laminated composite materials. In common laminated composite constructions, homogeneous elastic laminae are linked together to produce improved mechanical characteristics. However, significant interlaminar stresses, causing delamination, can be induced by sudden material characteristic changes at the interface between two materials (Zenkour, 2005). Functionally graded materials (FGMs), usually consisting of ceramic and metal mixtures, are developed to overcome the drawbacks of classical composites by providing a smooth material transition. In these materials, the interface problems of classical composites can be eliminated by gradually changing the volume fraction of the constituent materials in the thickness direction. Thus, a smooth stress distribution is provided (Zenkour and Alghamdi, 2010). The powder metallurgy method is the most suitable and applicable process for FGM production. Porosity, controlled by compression and sintering temperature and time, is one of the critical parameters affecting the mechanical behavior of the parts produced with powder metallurgy (Pasha and B.M., 2022; Şanlı and Gavas, 2021).

Because of its excellent mechanical, biocompatibility, and corrosion resistance, titanium and its alloys are frequently employed in biomedical equipment. Ti-6Al-4V is one of the most popular titanium alloys due to its excellent mechanical and physical properties. In addition, ZrO<sub>2</sub> is a medical ceramic frequently used in dental applications, and its benefits, including strong biocompatibility, simple sterilization, and shaping, have drawn increasing attention (X. Zhang et al. 2018, Zhou et al. 2022). Also, it can be used as a second phase to reduce the sintering temperature and improve the mechanical properties of boron carbide (Biçer 2022). Besides using Ti-6Al-4V/ZrO<sub>2</sub> in biomedical applications, Ti-6Al-4V has been commonly utilized in the automotive industry, medical instruments, and gas turbines, due to its superior performance, such as high fracture toughness, specific strength, and corrosion resistance. Meanwhile, as a thermal barrier, zirconia is frequently bonded with Ti-6Al-4V to manufacture some complex parts used in aircraft turbines. Therefore, joining Ti-6Al-4V and ZrO<sub>2</sub> properly are crucial to achieve excellent joints (C. Zhang et al., 2020).

Recently, a substantial investigation has been performed on the dynamic behavior of small-scale structures under thermal and mechanical loads. However, the classical theories need to be revised to predict the dynamic behavior of micro/nanoscale structures. For this reason, to consider the small-scale effects, various theories have been proposed so far, such as the micro-morphic theory (MMT) defined by (Eringen and Suhubi, 1964), the nonlocal elasticity theory (NET) (Eringen, 1983), the strain gradient elasticity theory (SGT) (Kong et al., 2008), the modified couple stress theory (MCST) (Ke et al., 2012) and the nonlocal strain gradient theory (NSGT) (Li and Hu, 2015).

Porous small-scale structures under several loads and environments are gaining significance nowadays, and the free vibration and bending response of functionally graded material (FGM) porous nanoplates have been studied in numerous studies. Barati and Zenkour examined an FGM nanoplate's post-buckling behavior, considering the geometric imperfections and porosity based on the NET and high-order shear deformation theory (HSDT) (Barati and Zenkour, 2019). Bendaho et al. studied an FGM nanoplate's free vibration analysis using the 2D and quasi-3D nonlocal shear deformation theories (Bendaho et al., 2019). By combining the finite element method (FEM) and nonlocal theory, Doan et al. analyzed the free vibration response of FGM porous nanoplates with different shapes, considering foundation effects (Doan et al., 2021). Kiani examined a carbon nanotube (CNT) reinforced composite plate's post-buckling problem subjected to uniform temperature rise using first-

order shear deformation theory (FSDT) (Kiani, 2017). The study, examining the effect of uniform or functionally grading distribution of the CNTs used as reinforcement, stated that the X-type FGM distribution of the CNT model resulted in higher buckling temperature and reduced the plate's deflection after buckling. Talebizadehsardari et al. developed a closed-form solution based on the third-order shell theory (TSDT) for the free vibration of porous FGM micro-nano shells (Talebizadehsardari et al., 2020). Using the TSDT, Coskun et al. examined an FGM porous microplate's static bending, free vibration, and buckling behavior (Coskun et al., 2019). They stated that every porosity distribution's effect is discerned due to the connection among the porosity variation and the material properties' heterogeneity.

The studies on FGM porous nanoplates are limited in the literature and have only addressed the free response of porous nanoplates with uniform and random porosity distributions. This study aims to investigate the free vibration and buckling response of an FGM porous nanoplate exposed to a thermal load using the HSDT and NGST. The nanoplate consists of Zirconia ( $ZrO_2$ ) and Titanium (Ti-6Al-4V) constituents that are graded according to a power law across the thickness. The porosity is inevitable due to the nature of such structures. In addition, it may be desirable to create porosity for lightweight structures by design in specific areas of use. The proposed method considers four different porosity distributions and models for FGM porous nanoplates using the HSDT and NGST. Especially the temperature-dependent material properties of the plate's constituents, Zirconia ( $ZrO_2$ ) and Titanium (Ti-6Al-4V), are considered in the study due to their effectiveness in the dynamic behavior of the nanoplate. By applying Navier's method, the effects of porosity distribution, nonlocal and size parameters, and thermal force are analyzed, and some interesting new results are also presented.

## 2. MATERIALS AND METHODS

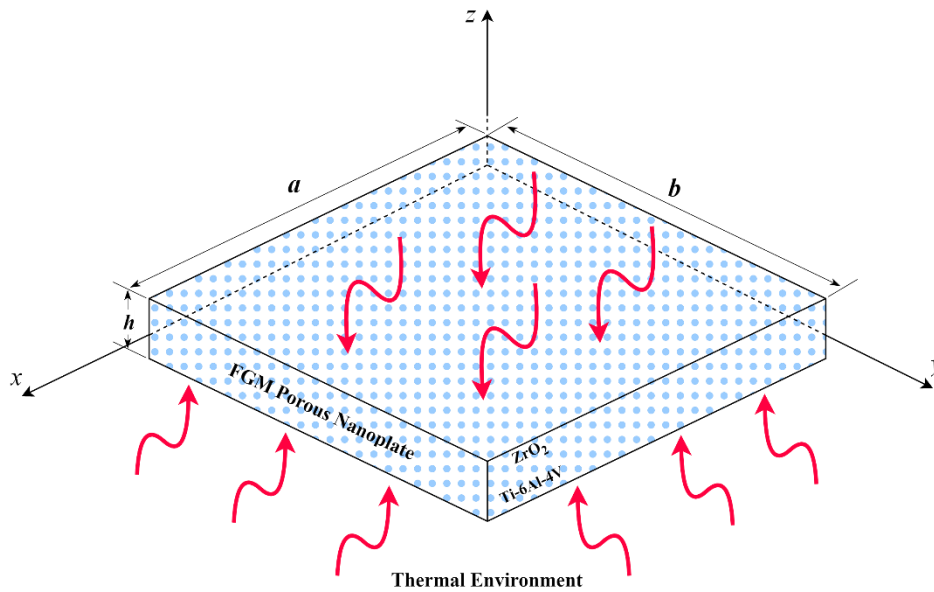
Figure 1 depicts a porous FGM nanoscale plate in a thermal environment with the sizes  $a$  (width),  $b$  (length), and  $h$  (thickness). In contrast, the nanoplate's upper and lower surfaces are, in turn, made of Zirconia ( $ZrO_2$ ) and Titanium (Ti-6Al-4V). Moreover, these two components are functionally graded according to a power law between surfaces. The temperature-dependent material properties and porosity distribution patterns are explained below.

### 2.1 Temperature-dependent material properties

The effective material properties of ceramic ( $ZrO_2$ ) and metal (Ti-6Al-4V) material constituents can be defined as temperature-dependent with the following (Touloukian 1967; Esen, 2021a; Esen, 2021b):

$$P = P_0(P_{-1}T^{-1} + 1 + P_1T + P_2T^2 + P_3T^3) \quad (1)$$

As presented in Table 1, the symbols of  $P_0$ ,  $P_{-1}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ , and  $P_3$  are experimentally defined characteristic material constants based on degrees of temperature  $T$ . Because of the nano-size, a uniform temperature rise case is only managed with a stress-free state at ( $T_0 = 300$  K), where  $\Delta T = T - T_0$ .



**Figure 1.** An FGM porous nanoplate in a thermal field

**2.2 Porosity patterns and effective properties**

The plate's effective material properties can be defined by the volume fractions ( $V_c$  and  $V_m$ ) and properties ( $P_c$  and  $P_m$ ) of ceramic and metal components, according to a power-law grading with the following formula (Najafi et al., 2017; Esen 2019):

$$P_{ef} = V_c P_c + V_m P_m \tag{2}$$

$$V_c = \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^p, V_m = 1 - V_c \quad 0 \leq n < \infty$$

where  $p$  is the material grading (power-law) constant. According to Equation (2), the density, modulus of elasticity, Poisson's ratio, and thermal expansion coefficient of an FGM plate without porosity are obtained as follows. (Reddy and Chin, 1998):

$$P(z) = [P_c - P_m]V_c + P_m \tag{3}$$

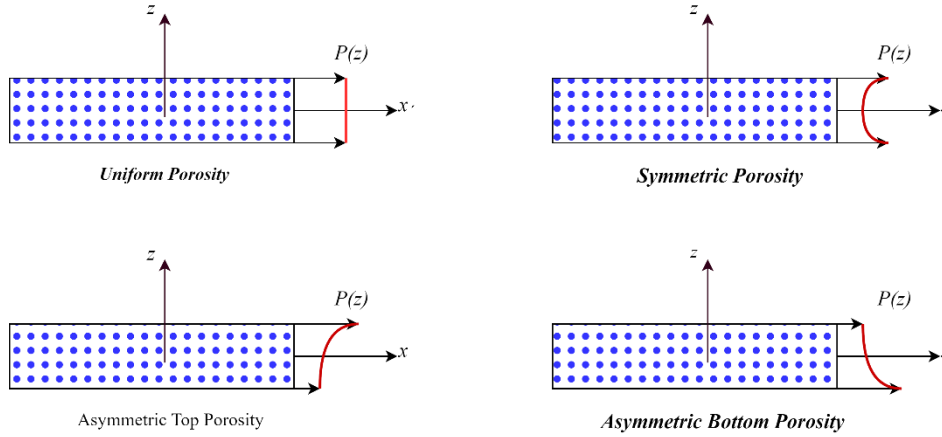
In this study, four types of porosity distribution across the thickness are considered as given in Figure 2. Accordingly, the effective material properties are obtained by substituting the total volume fraction ( $\alpha$ ) of porosity in Equation (2). Thus, by using Equation (2), Equations (4-7) are obtained for uniform, symmetric, asymmetric top and asymmetric bottom porosity patterns, respectively (Esen et al., 2022; Esen and Özmen 2022a).

$$P(z) = [P_c - P_m]V_c + P_m - \frac{\alpha}{2}[P_c + P_m] \tag{4}$$

$$P(z) = \{[P_c - P_m]V_c + P_m\} \left\{1 - \alpha \cos \left[\pi \frac{z}{h}\right]\right\} \tag{5}$$

$$P(z) = \{[P_c - P_m]V_c + P_m\} \left\{ 1 - \alpha \cos \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

$$P(z) = \{[P_c - P_m]V_c + P_m\} \left\{ 1 - \alpha \cos \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{z}{h} - \frac{1}{2} \right) \right] \right\} \quad (7)$$



**Figure 2.** Porosity distribution patterns across the thickness

### 2.3 Constitutive Relations

Using the HSDT, the displacement field is in the form (Aghababaei and Reddy 2009; Akavci, 2014)

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) - zw_{0,x} + f(z)\phi_x(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) - zw_{0,y} + f(z)\phi_y(x, y, t) \\ w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t) \end{aligned} \quad (8)$$

Here,  $u$ ,  $v$ , and  $w$  are the displacements and  $u_0(x, y, t)$ ,  $v_0(x, y, t)$  and  $w_0(x, y, t)$  represent the mid-plane displacements, and  $\phi_x(x, y, t)$  and  $\phi_y(x, y, t)$  are the cross-section's rotations, and  $(\cdot)_{,x}$  and  $(\cdot)_{,y}$  imply the partial derivatives for  $x$  and  $y$ . Finally, the parabolic shape function  $f(z)$  is assumed as (Reddy 1984; Aghababaei and Reddy, 2009):

$$f(z) = z - \frac{H_t}{\pi} \sin \left( \frac{\pi z}{H_t} \right) \quad (9)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_{0,x} - zw_{0,xx} + f(z)\phi_{xx} \\ v_{0,y} - zw_{0,yy} + f(z)\phi_{yy} \\ u_{0,y} + v_{0,x} - 2zw_{0,xy} + f(z)(\phi_{x,y} + \phi_{y,x}) \\ \dot{f}(z)\phi_y \\ \dot{f}(z)\phi_x \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Here,

$$g(z) = 1 - \frac{df(z)}{dz} \quad (11)$$

Including the thermal effect, the constitutive relationships of the HSDT and NSGT for the porous FGM nanoplate can be stated as follows (Lim et al., 2015; Jalaei and Thai 2019):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} [1 - (ea)^2 \nabla^2] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} - \alpha_{xx} \Delta T \\ \varepsilon_{yy} - \alpha_{yy} \Delta T \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} [1 - l_m^2 \nabla^2] \quad (12)$$

where  $\varepsilon$  and  $\gamma$  are the normal and shear strains, and the stiffnesses  $Q_{ij}$  are:

$$Q_{11} = Q_{22} = \frac{E(z)}{1 - \nu^2}, Q_{12} = \frac{\nu E(z)}{1 - \nu^2}, Q_{44} = Q_{55} = Q_{66} = \frac{E(z)}{2(1 + \nu)} \quad (13)$$

And the resultants of the force and moment can be defined as;

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \\ P \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ij} & B_{ij} & C_{ij} \\ B_{ij} & D_{ij} & E_{ij} \\ C_{ij} & E_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \kappa \\ \kappa_\phi \end{Bmatrix}, (i, j = 1, 2, 6) \quad (14)$$

$$\{R\} = [F_{ij}] \{\phi\}, (i, j = 4, 5) \quad (15)$$

where,

$$N = \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix}, \quad M = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix}, \quad P = \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_{xy} \end{Bmatrix}, \quad R = \begin{Bmatrix} R_x \\ R_y \end{Bmatrix}, \quad (16)$$

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} u_{0,x} \\ v_{0,y} \\ u_{0,y} + v_{0,x} \end{Bmatrix}, \quad \kappa = \begin{Bmatrix} w_{0,xx} \\ w_{0,yy} \\ 2w_{0,xy} \end{Bmatrix}, \quad \kappa_\phi = \begin{Bmatrix} \phi_{x,x} \\ \phi_{y,y} \\ \phi_{x,y} + \phi_{y,x} \end{Bmatrix}, \quad \phi = \begin{Bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \end{Bmatrix}$$

and the stiffness coefficients are described by:

$$(A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}, D_{ij}, E_{ij}, G_{ij}) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z, f(z), z^2, zf(z), f(z)^2) Q_{ij} dz \quad (i, j = 1, 2, 6), \quad (17)$$

$$F_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} (g(z))^2 Q_{ij} dz \quad i, j = 4, 5$$

Thermally-induced force and moment are described by (Kiani, 2017):

$$\begin{bmatrix} N_{xx}^T & M_{xx}^T \\ N_{yy}^T & M_{yy}^T \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{12} & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{xx}(z, T) \\ \alpha_{yy}(z, T) \end{bmatrix} \Delta T(1, z) dz \quad (18)$$

Strain energy

$$U = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{xz} \gamma_{xz} + \tau_{yz} \gamma_{yz}) dV \quad (19)$$

Kinetic energy

$$T = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \int_{-h/2}^{h/2} \rho(z)[(\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2)] dzdydx \tag{20}$$

The external potential energy of transverse  $q(x, y, t)$  and thermal loads

$$V_{qT} = \int_{\Omega} \left[ q(x, y, t)w_0 - N_{xx}^T \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} - N_{yy}^T \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right] d\Omega \tag{21}$$

Using the Hamilton principle (Reddy, 2007)

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T - \delta U + \delta(V_{qT}))dt = 0 \tag{22}$$

By substituting Equations (19), (20) and (21) into Equation (22) and after performing the integration, setting each coefficient of  $\delta u_0, \delta v_0, \delta w_0, \delta \phi_x$  and  $\delta \phi_y$  to zero, the equations of motion are:

$$\left(1 - I_m^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) \begin{bmatrix} N_{x,x} + N_{xy,y} \\ N_{xy,x} + N_{y,y} \\ M_{x,xx} + M_{y,yy} + 2M_{xy,xy} \\ P_{x,x} + P_{xy,y} - R_x \\ P_{xy,x} + P_{y,y} - R_y \end{bmatrix} = \left(1 - (ea)^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) \begin{bmatrix} I_1 \ddot{u}_0 - I_2 \ddot{w}_{0,x} + I_4 \ddot{\phi}_x \\ I_1 \ddot{v}_0 - I_2 \ddot{w}_{0,y} + I_4 \ddot{\phi}_y \\ S + \Psi \\ I_4 \ddot{u}_0 - I_5 \ddot{w}_{0,x} + I_6 \ddot{\phi}_x \\ I_4 \ddot{v}_0 - I_5 \ddot{w}_{0,y} + I_6 \ddot{\phi}_y \end{bmatrix} \tag{23}$$

With,

$$S = I_1 \ddot{w}_0 + I_2 (\ddot{u}_{0,x} + \ddot{v}_{0,y}) - I_3 (\ddot{w}_{0,xx} + \ddot{w}_{0,yy}) - I_5 (\ddot{\phi}_{x,x} + \ddot{\phi}_{y,y}) \tag{24}$$

$$\Psi = -q - N_{xx}^T w_{0,xx} + N_{yy}^T w_{0,yy}$$

And the inertia coefficients:

$$(I_1, I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6) = \int_{-h/2}^{h/2} \rho(z)(1, z, z^2 f(z), z f(z), [f(z)]^2) dz \tag{25}$$

The boundary conditions are described using edge displacements and forces as:



$$\left( \begin{array}{l} \text{at } x \text{ edges:} \\ \text{either } u \text{ or } N_x \\ \text{either } v \text{ or } N_{xy} \\ \text{either } w \text{ or } M_{x,x} + 2M_{xy,x} \\ \text{either } w_{,x} \text{ or } M_x \\ \text{either } \phi_x \text{ or } P_x \\ \text{either } \phi_y \text{ or } P_{xy} \end{array} \right), \left( \begin{array}{l} \text{at } y \text{ edges:} \\ \text{either } v \text{ or } N_{xy} \\ \text{either } u \text{ or } N_x \\ \text{either } w \text{ or } M_{y,y} + 2M_{xy,x} \\ \text{either } w_{,y} \text{ or } M_y \\ \text{either } \phi_x \text{ or } P_{xy} \\ \text{either } \phi_y \text{ or } P_y \end{array} \right) \quad (26)$$

**2.4 Navier's solution for rectangular plates with simply supports**

The simply supported boundary conditions applied to the plate satisfy the following equations:

$$\begin{aligned} \text{at } x = 0, a: N_x = v = w = M_x = P_x = \phi_y = 0 \\ \text{at } y = 0, b: N_y = u = w = M_y = P_y = \phi_x = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

However, non-classical boundary conditions controlled by:

$$\begin{aligned} \text{at } x = 0, a: \frac{\partial}{\partial x} (N_x, v, w, M_x, P_x, \phi_y) = 0 \\ \text{at } y = 0, b: \frac{\partial}{\partial y} (N_y, u, w, M_y, P_y, \phi_x) = 0 \end{aligned} \quad (28)$$

For the given boundary conditions, to solve Equation (24), the following Fourier series is used for the displacements:

$$\begin{aligned} u_0(x, t) &= \sum_m \sum_n U_{mn} \cos(\alpha x) \sin(\beta y) e^{i\omega_{mn}t} \\ v_0(x, t) &= \sum_m \sum_n V_{mn} \sin(\alpha x) \cos(\beta y) e^{i\omega_{mn}t} \\ w_0(x, t) &= \sum_m \sum_n W_{mn} \sin(\alpha x) \sin(\beta y) e^{i\omega_{mn}t} \\ \phi_x(x, t) &= \sum_m \sum_n X_{mn} \cos(\alpha x) \sin(\beta y) e^{i\omega_{mn}t} \\ \phi_y(x, t) &= \sum_m \sum_n Y_{mn} \sin(\alpha x) \cos(\beta y) e^{i\omega_{mn}t} \end{aligned} \quad (29)$$

where  $\alpha = \left(\frac{m\pi}{a}\right), \beta = \left(\frac{n\pi}{b}\right), i = \sqrt{-1}$ , and  $\omega_{mn}$  is the natural vibration frequency of the mode  $(m, n)$ .  $U_{mn}, V_{mn}, W_{mn}, X_{mn}$  and  $Y_{mn}$  are arbitrary coefficients. Substituting Equation (29) into Equation (23) the following eigenvalue equation is achieved.

$$(K - \omega_{mn}^2 M)d = 0 \quad (30)$$

Here,  $d = \{U_{mn} \ V_{mn} \ W_{mn} \ X_{mn} \ Y_{mn}\}^T$  are the vectors of the unknown coefficients. Additionally,  $K$  and  $M$  are the stiffness and mass matrices given in the Appendix Section with the coefficients. The following is used for the  $\lambda_{mn}$  dimensionless frequency parameter:

$$\lambda_{mn} = \omega_{mn}(a^2/h)\sqrt{\rho_m(1 - v_m^2)/E_m} \tag{31}$$

### 3. RESULTS AND DISSUSSION

#### 3.1 Validation

The proposed approach was validated by comparing the dimensionless frequencies of an FGM plate made of  $ZrO_2 / Ti-6Al-4V$  reviewed in Ref. (Huang and Shen, 2004). The dimensions of the square plates are assumed as  $a = b = 0.2\ m$  and  $h = 0.025\ m$  and with the material properties presented in Table 1. In the analyses, the dimensionless frequency parameter is specified by  $\lambda_{mn} = \omega_{mn}(a^2/h)\sqrt{\rho_m(1 - v_m^2)/E_m}$ , ( $T_0 = 300K$ ) equation. The obtained results, presented in Table 2, imply that the findings of the current methodology are in good correlation with the analytical solution of (Huang and Shen, 2004). Where the properties are defined at  $T_0 = 300K$ , with  $\rho_m = 4429\ kg/m^3$ ,  $v_m = 0.3$ ,  $E_m = 122.56\ GPa$ .

**Table 1.** Temperature-dependent coefficients of the properties (Reddy and Chin 1998)

Material	Property	$P_{-1}$	$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
Ti-6Al-4V	$E$ (Pa)	0	122.56e9	-4.586e-4	0	0
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	0	4512	0	0	0
	$\nu$	0	0.2884	1.121e-4	0	0
	$\alpha$ (1K <sup>-1</sup> )	0	7.5788e-6	6.638e-4	-3.147e-6	0
	$\psi$ (W/mK)	0	1	1.704e-4	0	0
ZrO <sub>2</sub>	$E$ (Pa)	0	244.27e9	-1.371e-3	1.214e-6	-3.681e-10
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	0	5680	0	0	0
	$\nu$	0	0.2882	1.133e-4	0	0
	$\alpha$ (1/K)	0	12.766e-6	-1.491e-3	1.006e-5	-6.778e-11
	$\psi$ (W/mK)	0	1.700	1.276e-4	6.648e-8	0

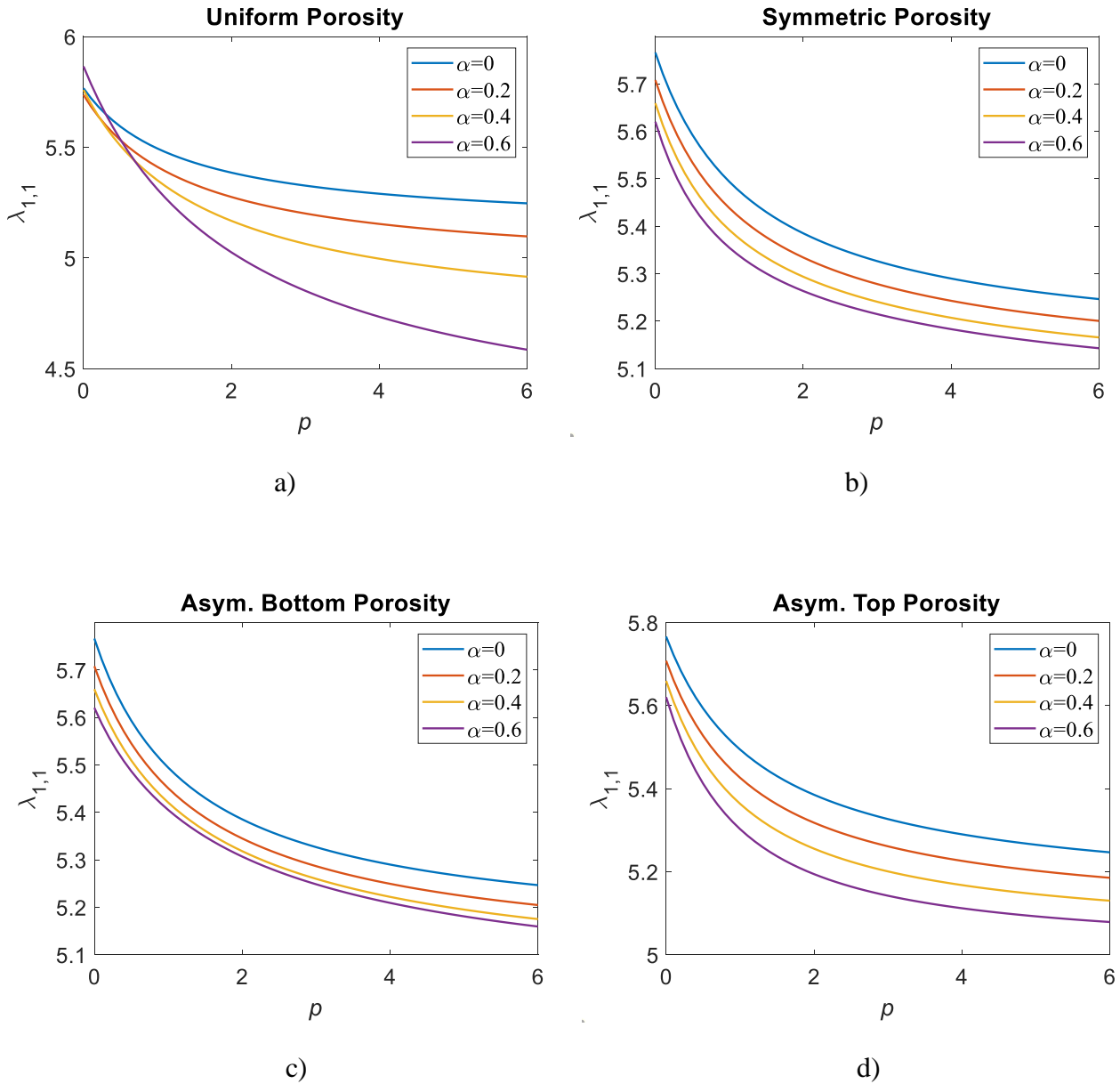
**Table 2.** The frequency parameter  $\lambda_{mn} = \omega_{mn}(a^2/h)\sqrt{\rho_m(1 - v_m^2)/E_m}$  comparisons for  $ZrO_2/Ti-6Al-4V$  plate

Mode	Huang, et al. (Huang and Shen, 2004)					Present HSDT				
	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(1,3)	(2,3)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(1,3)	(2,3)
$p$										
0.0	8.273	19.261	28.962	34.873	43.07	7.690	17.973	27.155	32.809	40.732
0.5	7.139	16.643	25.048	30.174	37.288	6.688	15.630	23.615	28.532	35.422
1	6.657	15.514	23.345	28.12	34.747	6.237	14.577	22.024	26.610	33.036
2	6.286	14.625	21.978	26.454	32.659	5.812	13.584	20.524	24.797	30.785
$\infty$	5.4	12.571	18.903	22.762	28.111	5.042	11.784	17.764	21.463	26.646

#### 3.2 Free Vibration Analyses

A small-scale simply supported square plate is treated for the free vibration behavior of the FGM nanoplate, with the sizes of  $a=1nm$ ,  $b=a$ , and  $h=a/10$ . The plate assumed as made of ceramic ( $ZrO_2$ ) and metal ( $Ti-6Al-4V$ ) components based on the temperature-dependent material properties

provided in Table 2. The plate's frequencies  $\omega_{mn}$  for the  $(m, n)$  modes are calculated using the eigenvalue Equation (31). Later the dimensionless frequency parameters are obtained with  $\lambda_{mn} = \omega_{mn}(a^2/h)\sqrt{\rho_m(1 - \nu_m^2)/E_m}$  equation. Here  $\rho_m$ ,  $E_m$ , and  $\nu_m$  are the metal component's material properties at room temperature.

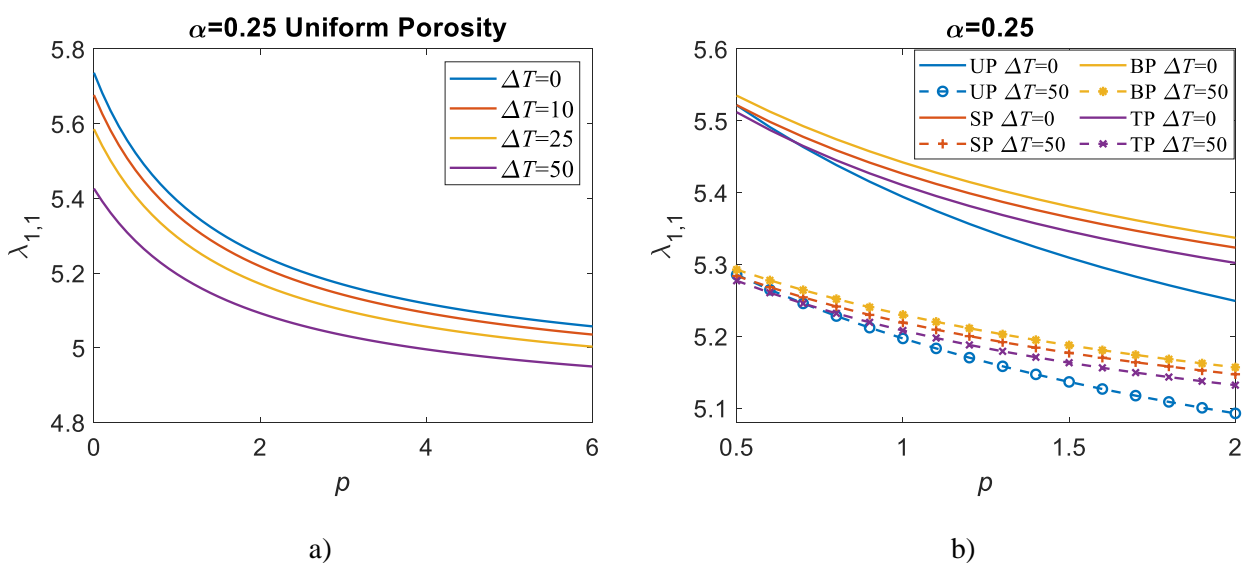


**Figure 3.** The dimensionless frequency  $\lambda_{l,l}$  variation of nanoplate with different porosity patterns depending on the material grading constant ( $p=0.2-5$ ) and porosity rate ( $\alpha=0, 0.2, 0.4$  and  $0.6$ ), for nonlocal  $e_0a=0$  and material size  $l_m=0$  parameters, and temperature rise  $\Delta T=0$

Considering the four porosity patterns, the  $\lambda_{l,l}$  dimensionless frequency variations are depicted in Figure 3 depending on the material grading (power-law) constant  $p$  for the various porosity rates ( $\alpha=0, 0.2, 0.4$ , and  $0.6$ ). Here, the temperature rise  $\Delta T$ , and the nonlocal  $e_0a$  and material size  $l_m$  parameters are zero. As illustrated in Figure 3, the  $\lambda_{l,l}$  dimensionless frequency of the nanoplate decays rapidly for  $p \leq 2$ . Afterwards, except for the uniform porosity  $\alpha=0.6$  case, the declining trend decelerates and approaches the limit for larger  $p$  values. This indicates that the nanoplate's metal

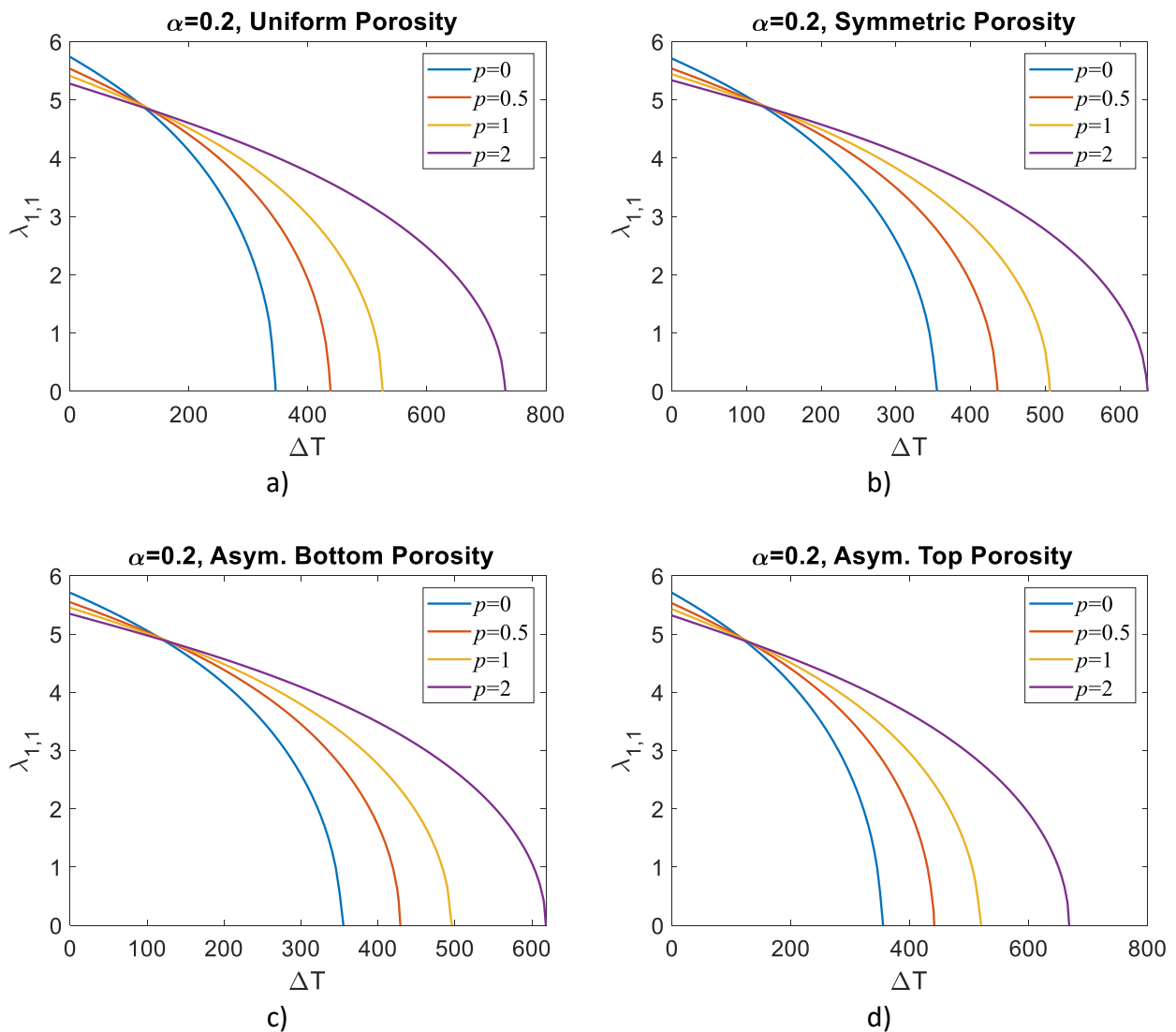
content is higher, and the entire composition tends towards a homogeneous metal structure. The main tendencies of the curves demonstrate that the dimensionless frequencies will drop as the stiffness of the plate is lowered for greater material grading constant values. However, as the porosity rate increases, the dimensionless frequency of the nanoplate also declines. Consequently, rising the porosity rate from 0 to 0.4 for the value of material grading constant  $p=2$  reduced the calculated dimensionless frequency from 5.385 to 5.168, 5.294, 5.318, and 5.255 in uniform, symmetrical, asymmetrical bottom, and asymmetrical top porosity patterns, respectively. Accordingly, the influence of the porosity rate on the dimensionless frequency is in the order from the largest to the smallest as uniform, asymmetrical bottom, symmetrical, and asymmetrical top porosity patterns, respectively. Finally, as can be seen from Figure 3, due to the stiffness variation, both the porosity and its distribution function change the nanoplate's free vibration (Esen and Özmen, 2022a).

Figure 4a shows the frequency variation of the nanoplate with uniform porosity distribution depending on material grading constant and temperature rise for the constant value of porosity rate  $\alpha=0.25$  and  $e_0\alpha=l_m=0$ . If the composition of the material is rich in ceramics, i.e.,  $p \leq 1$ , the effect of the temperature increase is small due to the better temperature behavior of the ceramic in the composition. However, for all patterns, the increase in the metal component rapidly decreases the frequencies because of the softening influence of the temperature rise, as well as the lower strength compared to the ceramic-rich composition. In Figure 4b, the dimensionless frequency alterations of the nanoplate are presented for the different porosity patterns with the application of  $\Delta T=50$  K temperature rise. Accordingly, in each porosity pattern, the dimensionless frequency of the nanoplate decreased with the temperature rise. The effect of porosity patterns on dimensionless frequency in a ceramic-rich plate was also lower compared to a metal-rich plate. In other words, for a constant material grading constant, the dimensionless frequency differences between the porosity patterns increase as the metal ratio of the nanoplate is increased. Accordingly, in a nanoplate with a fully ceramic composition ( $p=0$ ), the dimensionless frequency of the nanoplate decreased from 5.736 to 5.434 in uniform porosity, from 5.695 to 5.396 in symmetrical porosity, from 5.695 to 5.396 in asymmetric bottom porosity, and from 5.695 to 5.396 in asymmetric top porosity by increasing the temperature  $\Delta T=50$  K.



**Figure 4.** a) The dimensionless frequency  $\lambda_{1,1}$  variation of nanoplate with uniform porosity pattern dependent on the material grading constant ( $p=0-6$ ) and temperature rise ( $\Delta T=0, 10, 25$  and  $50$  K) for porosity rate  $\alpha=0.25$ ,  $a/h=10$ , and  $e_0\alpha=l_m=0$ . b)

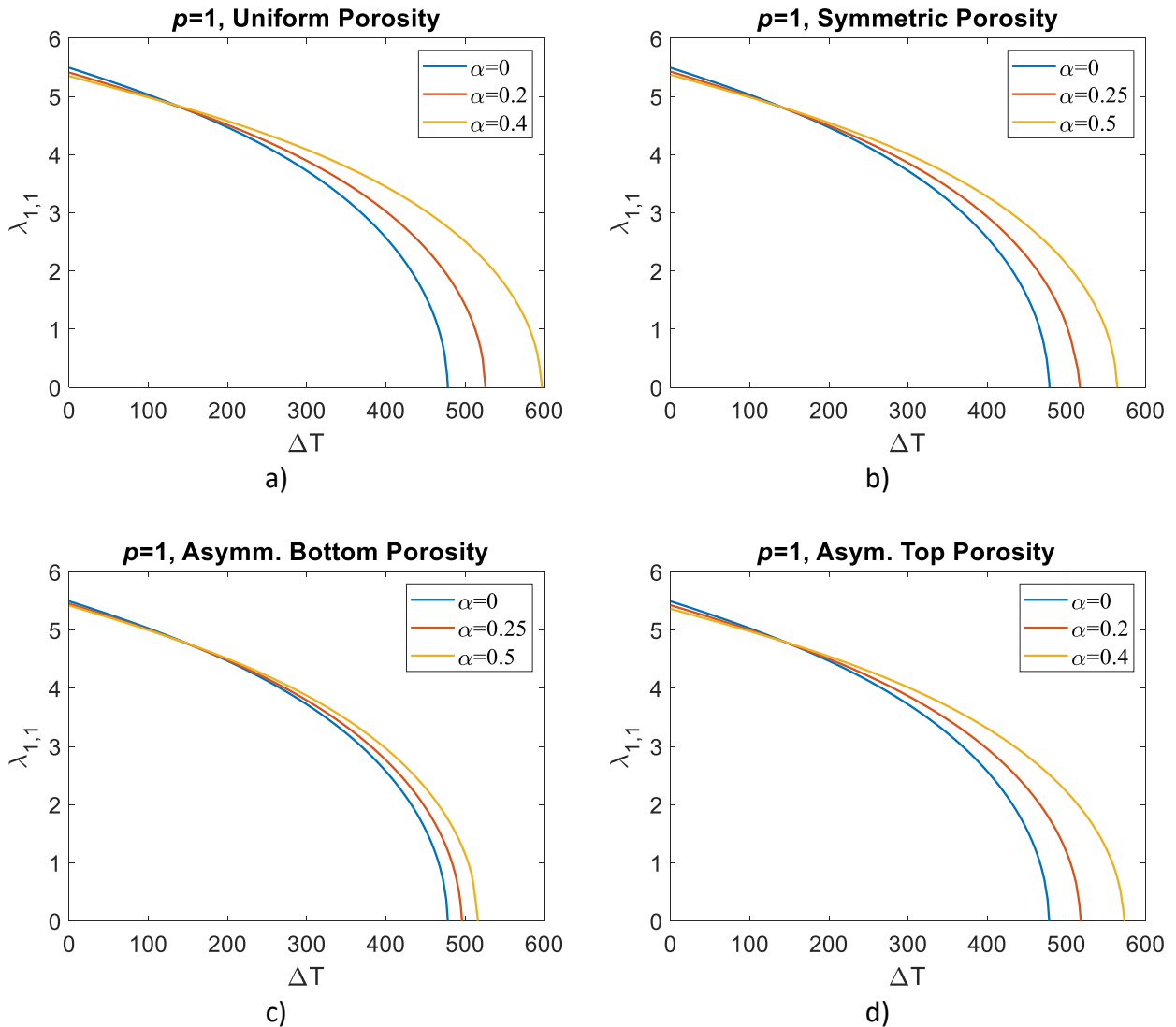
Comparisons of uniform (UP), symmetric (SP), asymmetric bottom (BP), and asymmetric top (TP) porosity patterns dependent on the temperature rise  $\Delta T=50$  K



**Figure 5.** The dimensionless frequency  $\lambda_{(1,1)}$  variations of of nanoplate with different porosity patterns dependent on the material grading constant ( $p=0, 0.5, 1, \text{ and } 2$ ) and temperature rise  $\Delta T$  for porosity rate  $\alpha=0.2$ , and  $a/h=10$  and  $e_0\alpha=l_m=0$

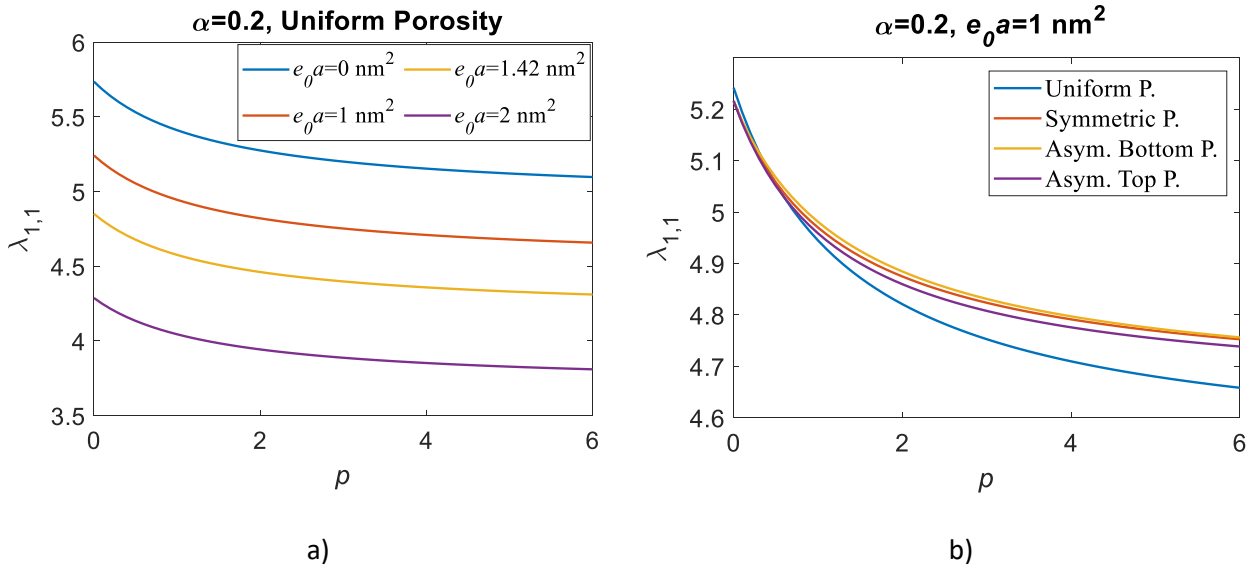
Considering different porosity patterns, Figure 5 illustrates the impact of material grading constant on buckling temperatures for a porosity rate of  $\alpha=0.2$ . In general, up to a temperature rise of approximately  $\Delta T=120$  K, increasing the material grading constant decreased the dimensionless frequencies in all porosity patterns. After the  $\Delta T=120$  K temperature rise, increasing the material grading constant slowed down the decrease rate of dimensionless frequency. According to the power law, at the value of material grading constant  $p=0$ , the plate is completely made of  $ZrO_2$ , and at  $p=2$ , approximately 83% of the plate is metal, and the remaining part is  $ZrO_2$ . Since the thermal expansion coefficient and density of Ti-6Al-4V ( $\alpha_b=6.9414 \times 10^{-6}$  1/K and  $\rho_b= 4512$  kg/m<sup>3</sup>) at room temperature are lower than the thermal expansion coefficient and density of  $ZrO_2$  ( $\alpha_t=1.8590 \times 10^{-5}$  1/K and  $\rho_t= 5680$  kg/m<sup>3</sup>), the buckling temperature of the plate increased as the metal (Ti-6Al-4V) ratio in the plate increased. Therefore, as the metal composition in the nanoplate improved, the buckling temperature of the plate shifted towards higher temperature values. When comparing the porosity patterns, the buckling temperatures of the nanoplate at  $p=0$  were calculated as 345.5 K, 355 K, 355 K, and 355.1 K in the uniform, symmetrical, asymmetrical bottom, and asymmetrical top porosity patterns, respectively. By

increasing the material grading constant to  $p=2$ , these temperature values, in turn, increased to 732 K, 637 K, 618 K, and 668.25 K in uniform, symmetrical, asymmetrical bottom, and asymmetrical top porosity patterns. Accordingly, the increase rates were obtained as 112%, 79.43%, 74.08%, and 88.23%, respectively.

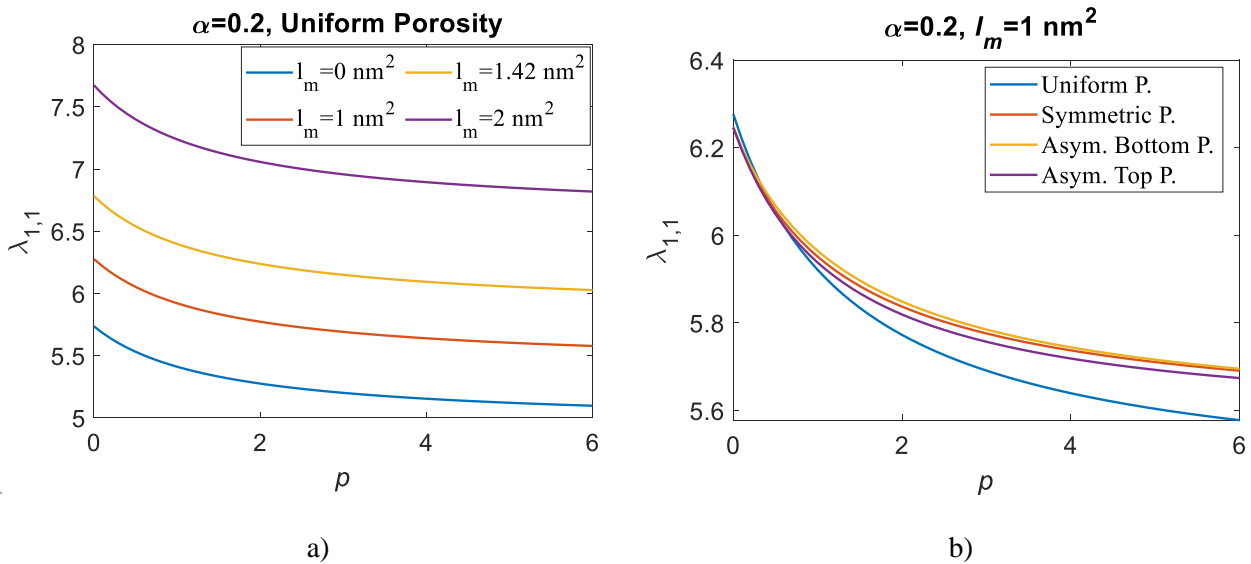


**Figure 6.** The dimensionless frequency  $\lambda_{(1,1)}$  variations of nanoplate with different porosity patterns dependent on the porosity rate ( $\alpha=0, 0.2$ , and  $0.4$ ) and temperature rise  $\Delta T$  for porosity rate  $\alpha=0.25$ , and  $a/h=10$  and  $e_0 a=l_m=0$

Figure 6 displays the effect of porosity rate on buckling temperatures for four porosity patterns. In general, in all porosity patterns, the dimensionless frequencies decreased by increasing the porosity rate up to a temperature rise of approximately  $\Delta T=140$  K. However, increasing the porosity rate after  $\Delta T=140$  K temperature rise difference slowed down the decrease rate of dimensionless frequency. Therefore, the buckling temperatures of the nanoplate increased. When comparing the porosity patterns, the buckling temperatures of the nanoplate, which was computed as 478 K at  $\alpha=0$ , increased to 597 K, 564 K, 516 K, and 573K in uniform, symmetrical, asymmetrical bottom, and asymmetrical top porosity patterns, respectively, by increasing the porosity rate of the nanoplate from 0 to 0.5. Accordingly, the increment rates were obtained as 24.89%, 17.99%, 7.94%, and 19.87%, respectively.



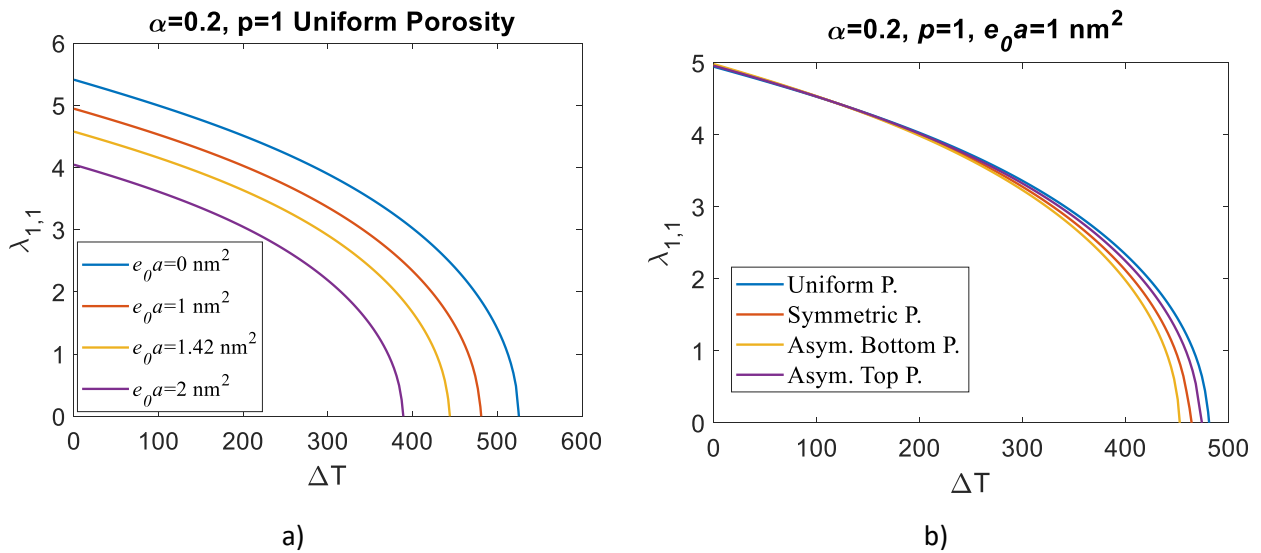
**Figure 7.** a) The dimensionless frequency  $\lambda_{(1,1)}$  variations of a nanoplate with uniform porosity distribution dependent on the material grading constant ( $p=0.2-5$ ) and nonlocal parameter ( $e_0\alpha=0, 1, 2$  and  $4 \text{ nm}^2$ ); for porosity rate  $\alpha=0.2$ , and  $l_m=\Delta T=0$ . b) Comparisons of different porosity patterns for  $\alpha=0.2$ ,  $e_0\alpha=1 \text{ nm}^2$ , and  $l_m=0$ .



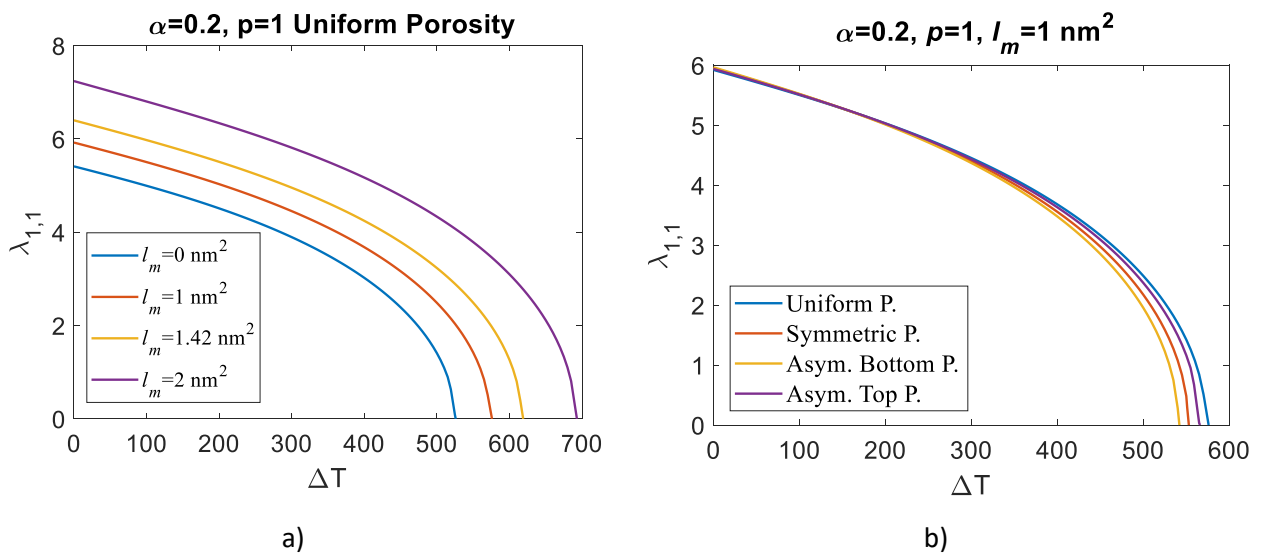
**Figure 8.** a) The dimensionless frequency  $\lambda_{1,1}$  variations of a nanoplate with uniform porosity distribution dependent on the material grading constant ( $p=0-6$ ) and material size parameter ( $e_0\alpha=0, 1, 2$  and  $4 \text{ nm}^2$ ); for porosity rate  $\alpha=0.2$ , and  $l_m=\Delta T=0$ . b) Comparisons of different porosity patterns for  $\alpha=0.2$ ,  $e_0\alpha=1 \text{ nm}^2$ , and  $l_m=0$ .

In case of uniform porosity distribution, Figure 7a shows the  $\lambda_{1,1}$  frequency variation for several nonlocal parameters ( $e_0\alpha=0, 1, 1.141$  and  $2 \text{ nm}^2$ ) and depending on the material grading constant ( $p=0-6$ ). Figure 7b presents a comparison of the results of the porosity patterns for a constant nonlocal parameter value of  $e_0\alpha=1 \text{ nm}^2$ . In all analyses, the porosity rate is taken as  $\alpha=0.2$  and the temperature rise, and material size parameter are assumed to be zero. Due to the softening effect on the nanoplate (Eringen 1983; Talebizadehsardari et al. 2020; Esen and Özmen 2022b), the rise of the nonlocal parameter declines the frequencies inversely proportional to the size of the parameter. But the opposite results are witnessed in Fig 8, as a result of the material size parameter's stiffness-enhancing effect of the frequencies increase depending on its amount (Lim, Zhang, and Reddy 2015; Esen et al., 2021a). Here, for comparison, the amounts of nonlocal and dimensional parameters are considered the same in this study but may differ. The real values of these can be described by molecular dynamics simulations

(Giannopoulos et al., 2008) and experimental studies (Li and Hu, 2016). When an evaluation is made for the effects of porosity patterns for a fixed nonlocal and material size parameters, given in Figure 7b and Figure 8b, the dimensionless frequencies are obtained in the order of asymmetric bottom, symmetric, asymmetric top, and uniform porosity distribution patterns from higher to lower, respectively. As a result, while the nonlocal and material size parameters' stiffness-changing effects, in turn, caused only a decrease or increase in the dimensionless frequencies to a certain extent, the effect of the porosity patterns on the dimensionless frequencies did not change.



**Figure 9.** a) The dimensionless frequency  $\lambda_{1,1}$  variations of a nanoplate with uniform porosity distribution depending on the nonlocal parameter ( $e_0a=0, 1, 2$  and  $4 \text{ nm}^2$ ) and temperature rise for porosity rate  $\alpha=0.2$  and  $l_m=0$ , b) Comparisons of different porosity patterns for  $\alpha=0.2, p=1, e_0a=1 \text{ nm}^2$ , and  $l_m=0$ .



**Figure 10.** a) The dimensionless frequency  $\lambda_{1,1}$  variations of a nanoplate with uniform porosity distribution depending on the material size parameter ( $l_m=0, 1, 2$  and  $4 \text{ nm}^2$ ), and temperature rise for porosity rate  $\alpha=0.2$  and  $e_0a=0$ , b) Comparisons of different porosity patterns for  $\alpha=0.2, p=1, l_m=1 \text{ nm}^2$ , and  $e_0a=0$ .

In case of uniform porosity distribution, Figure 9a shows the frequency and buckling temperature variations depending on the several nonlocal parameter values ( $e_0a=0, 1, 1.141$  and  $2$



nm<sup>2</sup>) for a constant porosity rate ( $\alpha=0.2$ ) and material grading constant ( $p=1$ ). Figure 9b presents a comparison of the porosity patterns for a constant nonlocal parameter value of  $e_0\alpha=1$  nm<sup>2</sup>,  $\alpha=0.2$ , and  $p=1$ . Due to the nonlocal parameter's softening effect on the nanoplate, the rise of this parameter decreases the dimensionless frequencies and buckling temperatures of the nanoplate reciprocally proportional to the size of the parameter (Esen and Özmen 2022a). But the opposite findings are observed in Figure 10a, because of the material size parameter's stiffness-enhancing effect, the frequencies and buckling temperatures increase depending on its amount. When an evaluation is made for the effects of porosity patterns for a fixed nonlocal and material size parameter, given in Figure 9. and Figure 10b, the buckling temperatures of the plate are obtained in the order of uniform, asymmetric top, symmetric, asymmetric bottom porosity distribution patterns from largest to smallest, respectively. In connection with this, buckling temperatures were calculated as 481 K, 474 K, 464 K, and 452.5 K in uniform, asymmetric top, symmetric, and asymmetric bottom porosity distribution patterns, with the inclusion of the nonlocal parameter, respectively. However, considering the material size parameter, these values were obtained as 576 K, 565 K, 553 K, and 542 K, respectively.

#### 4. CONCLUSIONS

This study used the HSDT and NGST to pattern and analyze the free vibration behavior of an FGM porous nanoplate under thermal fields. Additionally, the effects of porosity distribution on the free vibration behavior of the plate are considered with four porosity patterns; uniform, symmetrical, asymmetric bottom, and up distribution patterns. Navier's method is employed for the solving of motion equations. Finally, the factors influencing the free vibration behavior of the porous FGM nanoplate are examined individually to get the results given below.

- The porosity and its distribution pattern alter the nanoplate's free vibration behavior. Additionally, the effect of porosity patterns on dimensionless frequency in a ceramic-rich plate is lower compared to a metal-rich plate.
- In all porosity patterns, the dimensionless frequencies decreased by increasing the porosity rate up to a temperature rise of approximately  $\Delta T=140$  K. After that, increasing the porosity rate slowed down the decrement rate of dimensionless frequency, thus increasing the buckling temperatures of the nanoplate. The buckling temperatures of the nanoplate, which was computed as 478 K at  $\alpha=0$ , increased to 597 K, 564 K, 516 K, and 573K in uniform, symmetrical, asymmetrical bottom, and asymmetrical top porosity patterns, respectively, by increasing the porosity rate of the nanoplate from 0 to 0.5. Besides, rising the porosity rate from 0 to 0.4 for  $p=2$  reduced the calculated dimensionless frequency from 5.385 to 5.168, 5.294, 5.318, and 5.255 in uniform, symmetrical, asymmetrical bottom, and asymmetrical top porosity patterns, respectively.
- The nanoplate's material content significantly influences the free vibration response and buckling temperatures.
- An increase in temperature softens the nanoplate, thus reducing its dimensionless frequencies.
- The nonlocal and material size parameters, in turn, cause the nanoplate to behave softer and stiffer depending on their size. Thus, the nonlocal parameter decreases the dimensionless frequencies and buckling temperatures while the material size parameter increases them. In this context, the buckling temperature was calculated as 481 K in a uniform porosity

distribution pattern, including the nonlocal parameter, respectively. However, this value was obtained as 576 K, including the material size parameter.

## 5. CONFLICT OF INTEREST

Authors approve that to the best of their knowledge, there is not any conflict of interest or common interest with an institution/organization or a person that may affect the review process of the paper.

## 6. AUTHOR CONTRIBUTION

Ramazan ÖZMEN contributed to determining the research and its management concept, data analysis and interpretation of the results, critical analysis of the intellectual content, manuscript preparation, and final approval and full responsibility.

## 7. REFERENCES

- Aghababaei R., Reddy J.N., Nonlocal Third-Order Shear Deformation Plate Theory with Application to Bending and Vibration of Plates. *Journal of Sound and Vibration*, 326 (1–2), 277–289, 2009.
- Akavci S.S., An Efficient Shear Deformation Theory for Free Vibration of Functionally Graded Thick Rectangular Plates on Elastic Foundation. *Composite Structures* 108 (1), 667–676, 2014.
- Azeem P., B.M. R., Functionally Graded Materials (FGM) Fabrication and Its Potential Challenges & Applications. *Materials Today: Proceedings* (52) 413–418, 2022.
- Barati M.R., Zenkour A.M., Analysis of Postbuckling Behavior of General Higher-Order Functionally Graded Nanoplates with Geometrical Imperfection Considering Porosity Distributions. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 26 (12), 1081–88, 2019
- Bendaho B., Belabed Z., Bourada M., Benatta M.A., Bourada F., Tounsi A., Assessment of New 2D and Quasi-3D Nonlocal Theories for Free Vibration Analysis of Size-Dependent Functionally Graded (FG) Nanoplates. *Advances in Nano Research* 7 (4), 277–292, 2019.
- Biçer, H., Reactive Sintering of Boron Carbide Based Ceramics by SPS. *Journal of Materials and Mechatronics:A (JournalMM)*, 3(1), 129–136, 2022.
- Coskun S., Kim J., Toutanji H., Bending, Free Vibration, and Buckling Analysis of Functionally Graded Porous Micro-Plates Using a General Third-Order Plate Theory. *Journal of Composites Science* 3 (1), 15, 2019.
- Doan T. L., Le P.B., Tran T.T., Trai V.K., Pham Q.H., Free Vibration Analysis of Functionally Graded Porous Nanoplates with Different Shapes Resting on Elastic Foundation. *Journal of Applied and Computational Mechanics* 7 (3), 1593–1605, 2021.
- Eringen A.C., On Differential Equations of Nonlocal Elasticity and Solutions of Screw Dislocation and Surface Waves. *Journal of Applied Physics* 54 (9), 1983.
- Eringen, A.C., Suhubi E.S., Nonlinear Theory of Simple Micro-Elastic Solids-I. *International Journal of Engineering Science* 2 (2), 189–203, 1964.
- Esen I., Abdelrhmaan A.A., Eltaher M.A., Free Vibration and Buckling Stability of FG Nanobeams Exposed to Magnetic and Thermal Fields. *Engineering with Computers*, 38, 3463–3482, 2021a.
- Esen I., Alazwari M.A., Eltaher M.A., Abdelrahman A.A., Dynamic Response of FG Porous Nanobeams Subjected Thermal and Magnetic Fields under Moving Load. *Steel and Composite Structures* 42 (6), 805–26, 2022.

- Esen I., Daikh A.A., Eltahir M.A., Dynamic Response of Nonlocal Strain Gradient FG Nanobeam Reinforced by Carbon Nanotubes under Moving Point Load. *The European Physical Journal Plus* 136 (4), 458, 2021b.
- Esen I., Dynamic Response of a Functionally Graded Timoshenko Beam on Two-Parameter Elastic Foundations Due to a Variable Velocity Moving Mass. *International Journal of Mechanical Sciences Volumes (153–154)*, 21-35, 2019.
- Esen I., Özarpa C., Eltahir M.A., Free Vibration of a Cracked FG Microbeam Embedded in an Elastic Matrix and Exposed to Magnetic Field in a Thermal Environment. *Composite Structures* (261),113552, 2021.
- Esen I., Özmen R., Free and Forced Thermomechanical Vibration and Buckling Responses of Functionally Graded Magneto-Electro-Elastic Porous Nanoplates. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 1–38, 2022b.
- Esen I., Özmen R., Thermal Vibration and Buckling of Magneto-Electro-Elastic Functionally Graded Porous Nanoplates Using Nonlocal Strain Gradient Elasticity. *Composite Structures* (296) 115878, 2022a.
- Giannopoulos G.I., Kakavas P.A., Anifantis N.K., Evaluation of the Effective Mechanical Properties of Single Walled Carbon Nanotubes Using a Spring Based Finite Element Approach. *Computational Materials Science* 41 (4), 561–69, 2008.
- Huang X.L., Shen H.S., Nonlinear Vibration and Dynamic Response of Functionally Graded Plates in Thermal Environments. *International Journal of Solids and Structures* 41 (9–10), 2403-2427, 2004.
- Jalaei M.H., Thai H.T., Dynamic Stability of Viscoelastic Porous FG Nanoplate under Longitudinal Magnetic Field via a Nonlocal Strain Gradient Quasi-3D Theory. *Composites Part B: Engineering* 175, 107164, 2019.
- Ke L.L., Wang Y.S., Yang J., Kitipornchai S., Nonlinear Free Vibration of Size-Dependent Functionally Graded Microbeams. *International Journal of Engineering Science* 50 (1), 256-267, 2012.
- Kiani Y., Thermal Post-Buckling of FG-CNT Reinforced Composite Plates. *Composite Structures* 159, 299-306, 2017.
- Kong S., Zhou S., Nie Z., Wang K., The Size-Dependent Natural Frequency of Bernoulli-Euler Micro-Beams. *International Journal of Engineering Science* 46 (5), 427-447, 2008.
- Li L., Hu Y., Buckling Analysis of Size-Dependent Nonlinear Beams Based on a Nonlocal Strain Gradient Theory. *International Journal of Engineering Science* (97) 84–94, 2015.
- Li L., Hu Y., Nonlinear Bending and Free Vibration Analyses of Nonlocal Strain Gradient Beams Made of Functionally Graded Material. *International Journal of Engineering Science* (107), 77-99, 2016.
- Lim C.W., Zhang G., Reddy J.N., A Higher-Order Nonlocal Elasticity and Strain Gradient Theory and Its Applications in Wave Propagation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* (78), 298-313, 2015.
- Najafi F., Shojaefard M.H., Googarchin H.S., Nonlinear Dynamic Response of FGM Beams with Winkler–Pasternak Foundation Subject to Noncentral Low Velocity Impact in Thermal Field. *Composite Structures* (167) 132-43, 2017.
- Reddy J.N., Chin C.D., Thermomechanical Analysis of Functionally Graded Cylinders and Plates. *Journal of Thermal Stresses* 21 (6) 593–626, 1998.

- Reddy J.N., Nonlocal Theories for Bending, Buckling and Vibration of Beams. *International Journal of Engineering Science* 45 (2–8), 288-307, 2007.
- Reddy J.N., A Simple Higher-Order Theory for Laminated Composite Plates. *Journal of Applied Mechanics* 51 (4), 745–752, 1984.
- Şanlı, P., Gavas, M., Microstructure, Physical and Mechanical Properties of Al/SiC and Al/B4C Metal Matrix Composites Produced by Powder Metallurgy. *Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM)*, 2(2), 72-89, 2021.
- Talebizadehsardari P., Salehipour H., Shahgholian-Ghahfarokhi D., Shahsavar A., Karimi M., Free Vibration Analysis of the Macro-Micro-Nano Plates and Shells Made of a Material with Functionally Graded Porosity: A Closed-Form Solution.” *Mechanics Based Design of Structures and Machines* 0 (0), 1-27, 2020.
- Touloukian Y.S., *Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials*. Macmillan New York, 1967
- Zenkour A.M., A Comprehensive Analysis of Functionally Graded Sandwich Plates: Part 1- Deflection and Stresses. *International Journal of Solids and Structures* 42 (18-19) 5224–42, 2005.
- Zenkour A.M., Alghamdi N.A., Bending Analysis of Functionally Graded Sandwich Plates Under the Effect of Mechanical and Thermal Loads. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 17 (6) 419-32, 2010.
- Zhang C., Ji H., Xu H., Liang M., Huang J., Pei S., Li M., Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of Ultrasonic-Assisted Brazing Joints between Ti–6Al–4V and ZrO<sub>2</sub>. *Ceramics International* 46 (6) 7733–7740, 2020.
- Zhang X., Zhang G., Li J., He X., Wang Y., Hang R., Huang X., Tang B., Chu P.K., Cellular Response to Nano-Structured Zr and ZrO<sub>2</sub> Alloyed Layers on Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering* (90) 523-530, 2018.
- Zhou X., Zhang M., Xu D., Geng S., Wang Q., Wang F., Microstructural Evolution, Corrosion Behavior and Cytotoxicity of Ti-6Al-4V/ZrO<sub>2</sub> Composite Fabricated by Directed Energy Deposition for Implant Biomaterial.” *Journal of Alloys and Compounds* (892) 161820, 2022.

**8. APPENDIX**

$$\begin{aligned}
 K_{11} &= (A_{11}\alpha^2 + A_{66}\beta^2)c_2 & K_{12} &= (A_{12} + A_{66})\beta\alpha c_2 \\
 K_{13} &= -B_{11}\alpha^3 c_2 & K_{14} &= (C_{11}\alpha^2 + C_{66}\beta^2)c_2 \\
 K_{15} &= (C_{12} + C_{66})\beta\alpha c_2 & K_{21} &= K_{12} \\
 K_{22} &= (A_{66}\alpha^2 + A_{22}\beta^2)c_2 & K_{23} &= -B_{22}\alpha^3 c_2 \\
 K_{24} &= K_{15} & K_{25} &= (C_{66}\alpha^2 + C_{22}\beta^2)c_2 \\
 K_{31} &= K_{13} & K_{32} &= K_{23} \\
 K_{33} &= (D_{11}\alpha^4 + 2D_{12}\alpha^2\beta^2 + 4D_{66}\alpha^2\beta^2 + D_{22}\beta^4)c_2 + (-N_{xx}^T\alpha^2 - N_{yy}^T\beta^2)c_1 & & \\
 K_{34} &= -(E_{11}\alpha^3 + (E_{12} + 2E_{66})\alpha\beta^2)c_2 & K_{43} &= K_{34} \\
 K_{35} &= -(E_{22}\beta^3 + (E_{12} + 2E_{66})\alpha^2\beta)c_2 & K_{53} &= K_{35} \\
 K_{44} &= (F_{55} + G_{11}\alpha^2 + G_{66}\beta^2)c_2 & K_{41} &= K_{14} \\
 K_{45} &= (G_{12} + G_{66})\alpha\beta c_2 & K_{42} &= K_{24} \\
 K_{51} &= K_{15} & K_{52} &= K_{25} \\
 K_{53} &= K_{35} & K_{54} &= K_{45} \\
 K_{55} &= (F_{44} + G_{66}\alpha^2 + G_{22}\beta^2)c_2 & & 
 \end{aligned}
 \tag{A1}$$

$$\begin{aligned}
 M_{11} &= I_1 c_1 & M_{12} &= 0 & M_{13} &= -\alpha I_2 c_1 & M_{14} &= I_4 c_1 & M_{15} &= 0 \\
 M_{21} &= 0 & M_{22} &= I_1 c_1 & M_{23} &= -\beta I_2 c_1 & M_{24} &= 0 & M_{25} &= I_4 c_1 \\
 M_{31} &= -\alpha I_2 c_1 & M_{32} &= -\beta I_2 c_1 & M_{33} &= I_3(\alpha^2 + \beta^2)c_1 + I_1 c_1 & M_{34} &= -\alpha I_5 c_1 & M_{35} &= -\beta I_5 c_1 \\
 M_{41} &= M_{14} & M_{42} &= 0 & M_{43} &= -\alpha I_5 c_1 & M_{44} &= I_6 c_1 & M_{45} &= 0 \\
 M_{51} &= 0 & M_{52} &= I_4 c_1 & M_{53} &= -\beta I_5 c_1 & M_{54} &= 0 & M_{55} &= I_6 c_1 \\
 c_1 &= 1 + (ea)^2(\alpha^2 + \beta^2) & & & & & c_2 &= 1 + l_m^2(\alpha^2 + \beta^2) & & 
 \end{aligned}
 \tag{A2}$$

---

**Araştırma Makalesi / Research Article**

---

**Parametric Optimization of Cutting Force and Temperature in Finite Element Milling of  
AISI P20 Steel**

Rüstem BİNALİ\*

Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0775-3817>, rustem.binali@selcuk.edu.tr

**Geliş/ Received:** 27.02.2023;

**Kabul / Accepted:** 10.04.2023

**ABSTRACT:** Multiple manufacturing methods are used in the manufacturing industry. The most commonly used method is machining methods. With machining methods, production can be made from both raw materials and finishing processes can be applied to products produced with different production methods. However, the initial cost of machining operations is quite high due to factors such as the machining parameters used during the process, the rigidity of the machine, and the machining conditions. Today, the finite element method (FEM) has been widely used in order to reduce the initial cost of machining. For this reason, in our study, the machining of AISIP20 material was carried out with the FEM. This study, four different cutting speeds, feed rates and two different cutting depths were used and the lateral feed rate was kept constant. As a result of the study, the cutting force values and temperature values that occurred depending on the machining parameters were evaluated by finite element analysis. Consequently, in the study, an increase in the cutting force occurred in general with the increase of feed, cutting depth and cutting speed parameters, and a decrease in temperature values occurred with an increase in cutting speed and feed and constant cutting depth. The lowest cutting force was 36.11 N, while the highest was 1951.42 N. The lowest and highest temperature values that occur during the process are 448.98 and 593.14 °C, respectively. In this regard, for the optimization of the parameters, the proportional change between the parameters and the finite elements as well as the physical processes can be performed for the desired final product.

**Keywords:** Milling, AISI P20, Finite elements, Cutting force, Temperature

---

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: rustem.binali@selcuk.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Binali, R. (2023). Parametric Optimization of Cutting Force and Temperature in Finite Element Milling of AISI P20 Steel. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 244-256.

## 1. INTRODUCTION

Today, cutting parameters and suitable cutting tools must be determined for machining operations especially for cutting of mixed geometries materials with high machining speeds (Kuntoğlu et al., 2020). The mechanical characteristics of the cutting tool play a significant role on the material removing performance from the surface and chip formation mechanism. In addition, the cutting strategy such as the environmental and physical properties of machine tool are also important. Therefore, the machining parameters and conditions of the materials should be selected properly (Demir et al., 2018; Salur, 2022). Machining parameters are not only effective on chip removal, but also on cutting forces, temperature, torque and roughness during and after machining. These cutting parameters are feed, cutting speed and cutting depth (Kuntoğlu and Sağlam, 2019; Binali et al., 2022). Irregular changes in the specified parameters will cause increased wear and poor surface quality due to cutting forces and temperatures. For this reason, it is imperative to select the optimal levels of cutting parameters considering the type of the material (Sağlam et al., 2006; Demir et al., 2018). Physical experiments can be performed to determine optimum processing conditions and parameters. However, the high cost of physical experiments directs researchers to alternative experimental studies. These studies are numerical models and are widespread today. The commonly used numerical modeling method is the finite element method (Günay et al., 2016; Korkmaz and Günay, 2018). With this method, tests can be carried out to explore the mechanical characteristics and service conditions of utilized samples as well as the machining operations. Process outputs such as cutting force, temperature, moment, power consumption obtained in physical machinability experiments can be easily determined by the finite element method (Korkmaz and Günay, 2018; Binali et al., 2021; Binali et al., 2022).

According to the literature review, machinability tests of many materials have been carried out for machining parameters with the finite element method, taking into account the process outputs. Zhang et al. focused a three-dimensional FEM for the estimation of cutting forces in the course of hard milling of AISI H13 steel (Zhang et al., 2017). Li et al. have worked on the simulation and experimentation of chip analysis in the course of hard milling processes (Li et al., 2019). Gök, in his study, compared the temperature and cutting forces values that occur by turning AISI 1045 with both FEM and physical (Gök, 2015). Yaşar et al. investigated the cutting forces in the course of turning process of AISI P20 steel as numerical and experimental analysis (Günay et al., 2016). Korkmaz and Günay studied the consumed energy and cutting force machinability of AISI 420 Martensitic steel with FEM (Korkmaz and Günay, 2018). Özlü and Uğur investigated the optimization of cutting forces in turning of Ti-6Al-4V alloy with FEM (Ozlu and Ugur, 2021). Özçelik and Bağcı investigated drilling processes with helical drill cutting tools using experimental and finite element methods. They emphasized that there is a similarity between the analyzes made according to FEM and the results of the physical experiment performed under dry conditions (Ozcelik and Bagci, 2006). Uçun and Aslantaş studied the effects of two different coatings on cutting forces, stress of tool and temperature in the machining of AISI 4340 steel with 2D-thermoviscoplastic cutting simulation (Uçun and Aslantas, 2011). In his study, Özel stated that the physical tests and FEM simulation results were similar in terms of cutting force in the machining of PCBN cutting tools with variable cutting edge form and AISI 4340 steel, and there was an improvement in surface integrity and tool life due to low heat generation and stress concentration (Özel, 2009). Galanis and Manolakos studied finite element modeling to predict cutting forces when turning AISI 316L. The physical tests cutting force values were compared with the numeric results and it was concluded that they can be estimated with good

accuracy with FEM (Galanis and Manolakos, 2014). Binali et al., in their study, optimized the machinability parameters of S960QL material using the FEM (Binali et al., 2021).

The aim of the study is to show that machinability tests can be done using the finite element method and it shows that physical tests can be reduced. In this study, AISI P20 mold steel was chosen as the workpiece material and TiAlN coated cemented carbide cutting tool was selected as the cutting tool to investigate the temperatures and cutting forces. Steels used in the molding industry are usually heat treated after processing for higher hardness. In this way, it is purpose to increase the resistance and high strength of the molds used at high temperatures. For this reason, it is desired that the process outputs do not damage the material before hardening process. In the literature search, it has been determined that there are studies on AISI P20, but it has been determined that the milling with the FEM is insufficient for the purpose of the article, and this study will shed light on the studies to be made on this material.

## 2. MATERIALS AND METHODS

Machinability tests were carried out using the FEM. The dimensions of workpiece samples used in the simulations are 25x25x50 mm in size. The chemical content of AISI P20 material is given in Table 1. The cutting tool used in the study was supplied by manufacturer's recommendations (AOMT123608PEER-M). During the experiments, four different cutting speeds and feeds and two different cutting depths were used. Table 2 summarizes the experimental parameters used in the experiments.

**Table 1.** Chemical content of AISI P20 (ASTM, 2022)

<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>P</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>S</b>	<b>Mo</b>
<b>wt%</b>	<b>wt%</b>	<b>wt%</b>	<b>wt%</b>	<b>wt%</b>	<b>wt%</b>	<b>wt%</b>
0.40	2.00	0.03	1.00	0.8	0.03	0.55

**Table 2.** Experimental parameters

<b>Parameters</b>	<b>1. Level</b>	<b>2. Level</b>	<b>3. Level</b>	<b>4. Level</b>
V (m/min)	170	200	230	270
f (mm/tooth)	0.075	0.113	0.169	0.253
a (mm)	0.75	1.50	-	-

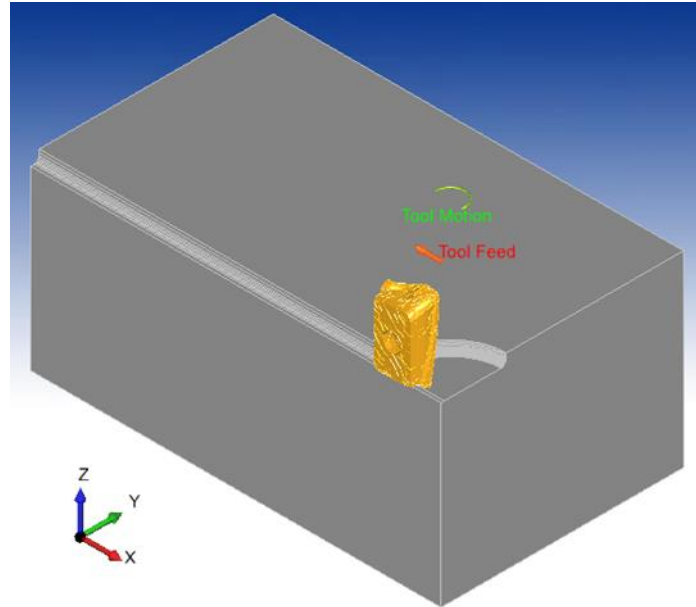
Johnson-Cook (JC) parameters are required for the processing of AISI P20 material in the finite element method. The model equation used is given in equation 1 (Korkmaz and Günay, 2018). These parameters were derived from work by Shatla et al. (Shatla et al., 2001). JC model parameters are given in Table 3. The schematic representation of the simulation view is shown in Figure 1.

$$\sigma^0 = (A + B(\varepsilon^p)^n(1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0}))(1 - (\hat{T})^m) \quad (1)$$



**Table 3.** JC model parameters

<b>A</b> <b>(Mpa)</b>	<b>B</b> <b>(MPa)</b>	<b>c</b>	<b>n</b>	<b>m</b>	<b>T<sub>m</sub></b>
145	565.5	0.03	0.154	1.8	1753

**Figure 1.** Schematic view

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, the results of temperature and cutting force values will be discussed by considering simulation, optimization and analysis approaches. In this way, Taguchi S/N ratios for optimization, ANOVA and graph plot analysis for the results of cutting forces and temperatures obtained from simulation will be performed.

#### 3.1 Optimization with Taguchi S/N Ratios for Finite Element Modelling Results

Taguchi is extensively applied to experimental design and optimization for engineering problems (Zhang et al., 2007; Binali et al., 2022; Binali et al., 2022). Taguchi uses an objective function to determine the optimum parameters in a set of input parameters. In this way, it is tried to ensure that the outputs are at the desired level (Ghani et al., 2004). Taguchi basically aims to reduce the processing costs and the energy and labor consumed by limiting the number of experiments. In addition, it is desired to reach high quality in a shorter time. There are three types of objective functions: smaller better, nominal best, and larger better. In this study, the smaller the better type of target function was used to obtain as minimal cutting forces as possible. The levels, design and result values of the parameters used in the study are given in Table 4.

**Table 4.** Experimental design and results

a (mm)	f (mm/tooth)	V (m/min)	Temperature	Force component-X (N)	Force component-Y (N)	Force component-Z (N)
1	1	1	532.89	85.18	685.81	311.33
1	2	1	593.14	187.84	929.33	358.10
1	3	1	518.07	411.02	1218.22	446.82
1	4	1	504.95	381.27	836.10	386.88
1	1	2	460.13	138.51	735.44	300.29
1	2	2	478.83	143.11	940.41	384.35
1	3	2	520.48	325.98	1053.02	365.30
1	4	2	532.41	434.79	857.12	398.31
1	1	3	476.40	149.18	793.32	315.75
1	2	3	492.96	188.72	1034.98	416.53
1	3	3	523.79	344.47	1134.95	409.62
1	4	3	557.87	422.87	836.40	387.08
1	1	4	544.04	129.89	695.54	297.49
1	2	4	501.73	205.40	795.31	295.99
1	3	4	578.54	400.10	1216.16	502.68
1	4	4	547.87	375.63	842.06	394.99
2	1	1	448.98	-38.40	1094.42	239.21
2	2	1	478.11	193.52	1399.53	262.47
2	3	1	509.79	327.59	1951.42	393.95
2	4	1	494.62	548.82	1649.94	227.92
2	1	2	476.23	38.76	1076.57	235.89
2	2	2	494.98	238.23	1796.54	271.76
2	3	2	523.55	366.45	1457.72	203.59
2	4	2	512.53	653.42	1890.40	341.58
2	1	3	492.93	36.11	1090.53	249.30
2	2	3	510.63	339.45	1787.93	248.07
2	3	3	529.23	219.45	1936.73	281.72
2	4	3	565.43	694.02	1676.46	316.42
2	1	4	515.13	45.35	1121.51	221.77
2	2	4	548.04	166.79	1622.69	234.06
2	3	4	540.79	408.91	1886.80	301.81
2	4	4	518.00	746.71	1769.25	344.32

To find out the optimal points of the milling variables used this the study, the determined S/N ratios are given in Tables 5, 6, 7 and 8.

**Table 5.** Signal to noise ratios of X axis cutting force component

Level	V	f	a
1	<b>-46.31</b>	<b>-36.87</b>	-47.58
2	-46.98	-46.09	<b>-46.38</b>
3	-47.21	-50.75	-
4	-47.42	-54.22	-
Delta	1.10	17.36	1.20
Rank	3	1	2

By examining the data in Table 5, the effects of milling parameters on X-axis cutting force are feed rate, depth and speed, respectively. Ideal machining parameters are first feed rate and speed and second level of depth.

**Table 6.** Signal to noise ratios of Y axis cutting force component

Level	V	f	a
1	<b>-61.26</b>	<b>-59.01</b>	<b>-59.07</b>
2	-61.31	-61.80	-63.76
3	-61.73	-63.16	-
4	-61.34	-61.67	-
Delta	0.47	4.15	4.69
Rank	3	2	1

By examining the data in Table 6, the effects of milling parameters on the Y-axis cutting force are feed rate, speed and depth respectively. The ideal cutting parameters are first of feed rate, speed and depth.

**Table 7.** Signal to noise ratios of Z axis cutting force component

Level	V	f	a
1	-50.09	<b>-48.59</b>	-51.34
2	<b>-49.69</b>	-49.62	<b>-48.59</b>
3	-50.15	-50.90	-
4	-49.94	-50.75	-
Delta	0.47	2.31	2.75
Rank	3	2	1

By examining the data in Table 7, the effects of milling parameters on the Z-axis cutting force are cutting depth, speed and feed rate, respectively. Ideal machining parameters are second level of the speed and depth along with first level of feed.

**Table 8.** Average S/N response for the temperature

Level	V	f	a
1	-54.13	<b>-53.84</b>	-54.35
2	<b>-53.97</b>	-54.17	<b>-54.14</b>
3	-54.28	-54.49	-
4	-54.59	-54.46	-
Delta	0.62	0.64	0.21
Rank	2	1	3

By examining the data in Table 8, the effects of machining parameters on the cutting temperature in the course of the process are feed, cutting speed and cutting depth, respectively. Ideal machining parameters are 2nd of the V and depth and 1st of the f.

ANOVA analysis results obtained for cutting forces and temperature are given in Table 9, 10, 11 and Table 12.

**Table 9.** ANOVA for the X axis cutting force

	DoF	SS	MS	F-value	p value	PC (%)
V	3	6214	2071	0.24	0.864	0.55
f	3	896004	298668	35.29	0.000	79.83
a	1	17021	17021	2.01	0.169	1.52
Error	24	203120	8463			18.10
Total	31	1122359				

There are ANOVA analysis results of the parameters affecting the X-axis strength in Table 9. According to the results of the analysis, the effect values were respectively 79.83% feed rate, 1.52% cutting depth and 0.55% cutting speed. If we look at the significance levels, it can be said that the feed rate has an important effect on the X-axis force since the p value is less than 0.05.

**Table 10.** ANOVA for the Y axis cutting force

	<b>DoF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F-value</b>	<b>p value</b>	<b>PC (%)</b>
V	3	21392	7131	0.27	0.848	0.39
f	3	1372681	457560	17.21	0.000	24.75
a	1	3514079	3514079	132.15	0.000	63.36
Error	24	638176	26591			11.51
Total	31	5546327				

The parameters affecting the cutting force in Y-axis are listed in Table 10. According to the results of the analysis, these variables were observed respectively 63.36% for cutting depth, 24.75% for feed rate and 0.39% for cutting speed. If we look at the significance levels, it can be said that the amount of feed rate and the cutting depth have an important effect on the Y-axis force since the p values is less than 0.05.

**Table 11.** ANOVA for the Z axis cutting force

	<b>DoF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F-value</b>	<b>p value</b>	<b>PC (%)</b>
V	3	1300	433.4	0.21	0.892	0.75
f	3	41519	13839.6	6.56	0.002	23.97
a	1	79764	79764.5	37.82	0.000	46.05
Error	24	50618	2109.1			29.23
Total	31	173202				

ANOVA analysis results of the parameters affecting the Z-axis strength are given in Table 11. According to the results of the analysis, the effect values were 46.05% cutting depth, 23.97% feed rate and 0.75% cutting speed, respectively. If we look at the significance levels, it can be said that the amount of feed and the cutting depth have a significant effect on the Z-axis force since the p value is less than 0.05.

**Table 12.** ANOVA for the temperature

	<b>DoF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F-value</b>	<b>p value</b>	<b>PC (%)</b>	<b>DoF</b>
V	3	5860	5860	1953.4	2.36	0.096	17.07
f	3	7298	7298	2432.5	2.94	0.053	21.26
a	1	1315	1315	1314.8	1.59	0.219	3.83
Error	24	19849	19849	827.0			57.83
Total	31	34321					

As for temperature, the effecting parameters are given in Table 12. According to the results of the analysis, the effect values were respectively 21.26% feed rate, 17.07% cutting speed and 3.83% cutting depth.

In general, as a result of the evaluation of the ANOVA results, the least effect value on the cutting forces occurred at the cutting speed. In temperature values, the least effect occurred at the cutting depth. It has been concluded that the feed has the highest effect on cutting forces and temperature values.

### 3.2 Finite Elements Modelling Results for Cutting Force

In Figure 2 and Figure 3, cutting forces graphs are given at different depths of cut and depending on the variation of feed rate and cutting speed.

If we look at the cutting forces from a general point of view, an increase in cutting forces occurs as a result of increasing feed rates. It is seen that an increasing trend in cutting forces is visible with increasing depth. In addition, decreasing behavior for cutting forces were observed with the elevation of speed. But for some cases, decreasing trend for cutting forces were clear with the increase of feed and speed. This case can be explained by the material properties and specified cutting tool preferred in the experiments. In addition, the cause of the differences can be explained by the increased chip cross-sectional area and therefore the power required for the amount of chip removed from the material per unit time (Küçüktürk, 2013; Günay et al., 2018). This situation can also be explained by considering the reduced strength of the workpiece material with elevated temperature (Binali et al., 2021).

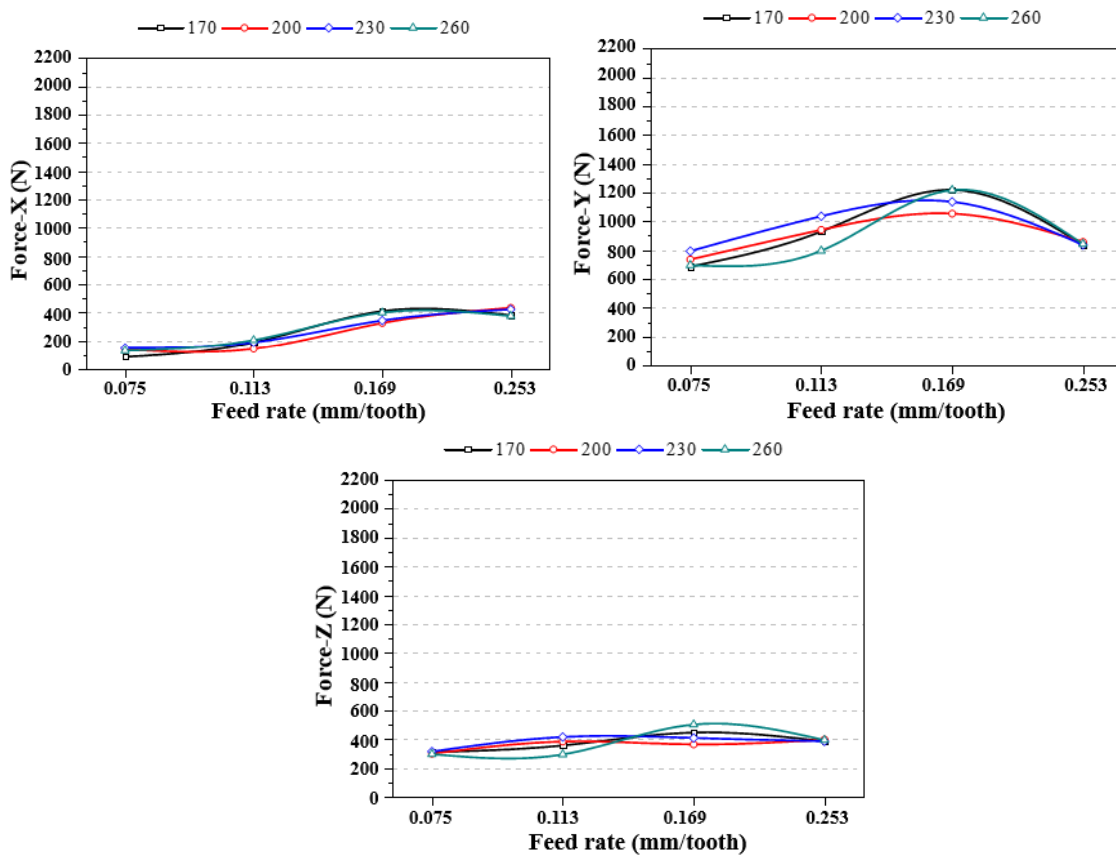


Figure 2. Cutting force graph based on feed and cutting speed at 0.75 mm cutting depth

As a result of the analysis of the graphics depending on the feed rate and cutting speeds, an increase in cutting forces occurs with an increase in the amount of feed in general. When evaluated according to cutting speeds, it is seen that the cutting force decreases with increasing cutting speeds and increases after a while with increasing feed rate. When the literature is examined, the increase in feed force increases the cutting force and the increase in cutting speed decreases the cutting force (Chinchanikar and Choudhury, 2013; Salur et al., 2020; Kuntoğlu et al., 2021). However, these explanations are used for turning and drilling experiments in the literature. Wavy results can occur because the cutting mechanics of the milling process are different from other methods (Binali, 2017). As a result of the evaluation of the data in Figure 2, the highest cutting force (1218.22 N) occurred in the Y axis direction with 0.169 mm/tooth f and 170 m/min V. The lowest force (85.18 N) value

occurred in the X-axis direction at 0.075 mm/tooth f and 170 m/min V. A change of approximately 1330% occurred between the highest and lowest strengths.

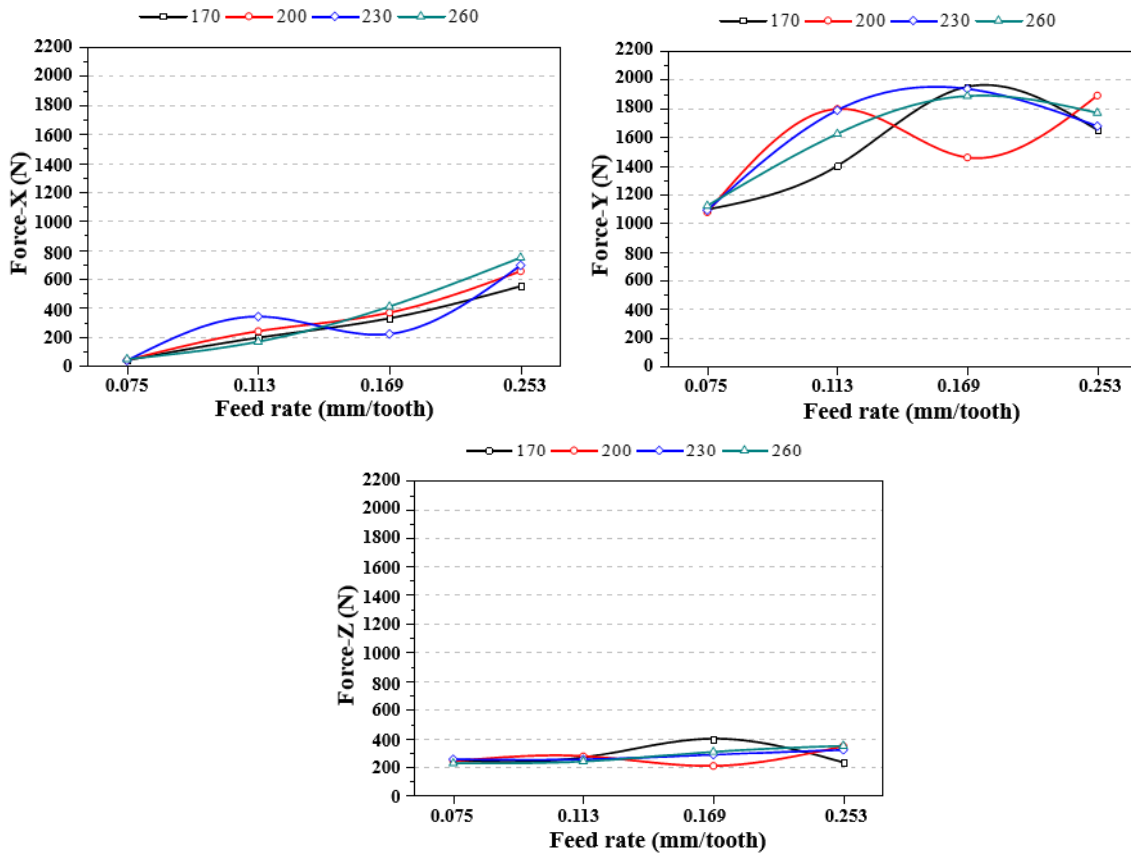


Figure 3. Cutting force graph based on feed and cutting speed at 1.5 mm cutting depth

Figure 3 shows the cutting force curves as a function of f and V values with the constant cutting depth at 1.5 mm. However, the fluctuating results were observed in cutting forces based on different cutting speeds. The highest cutting force (1951.42 N) occurred in the Y-axis direction with 0.169 mm/tooth f and 170 m/min V. The lowest cutting force (36.11 N) was monitored in the X-axis direction at 0.075 mm/tooth f and 230 m/min V. A change between the highest and lowest cutting force values were calculated as an approximately 5300%.

### 3.3 Finite Elements Modelling Results for Temperature

During machining tests, temperatures reveal in cutting area due to cutting forces and tribological contacts at the chip and tool faces. This temperature varies according to the workpiece, cutting tool, cutting parameters and conditions. This temperature causes wear on the material and tool, preventing the desired level of product being obtained. For this reason, it is necessary to optimize the temperature distributions according to the machining parameters in line with all these expressed information during machining. In Figure 4 and Figure 5, graphical evaluations of the temperature distributions formed during the process according to the 0.75 mm and 1.5 mm cutting depth are given.

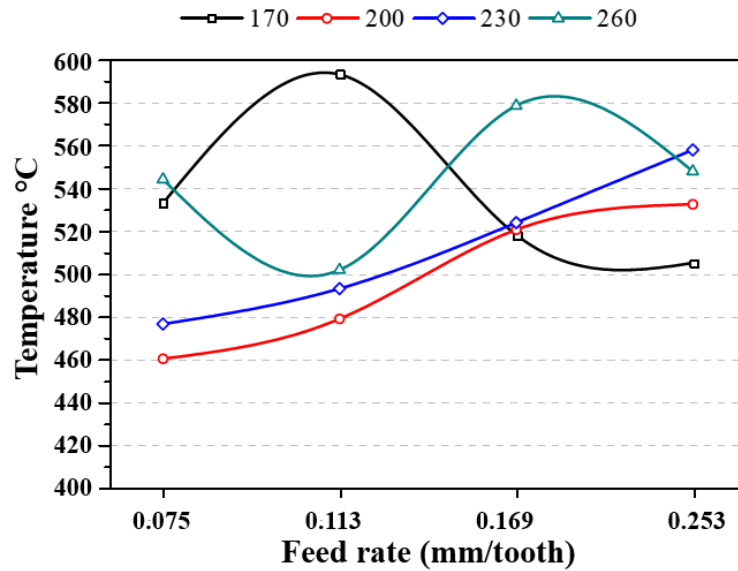


Figure 4. Temperature graph based on feed and cutting speed at 0.75 mm cutting depth

By examining the curves in Figure 4, an increase in the amount of temperature is observed depending on the constant V and the increasing f in the cutting depth. It is seen that there is a general increase in cutting temperatures with increasing V. The highest temperature value (593,14 °C) occurred at 0.75 mm cutting depth, 170 m/min V and 0.113 mm/tooth feed rate. The lowest temperature value (460,13 °C) occurred at 200 m/min V and 0.075 mm/tooth feed rate. A change of approximately 22.42% occurred between the highest and lowest temperature values.

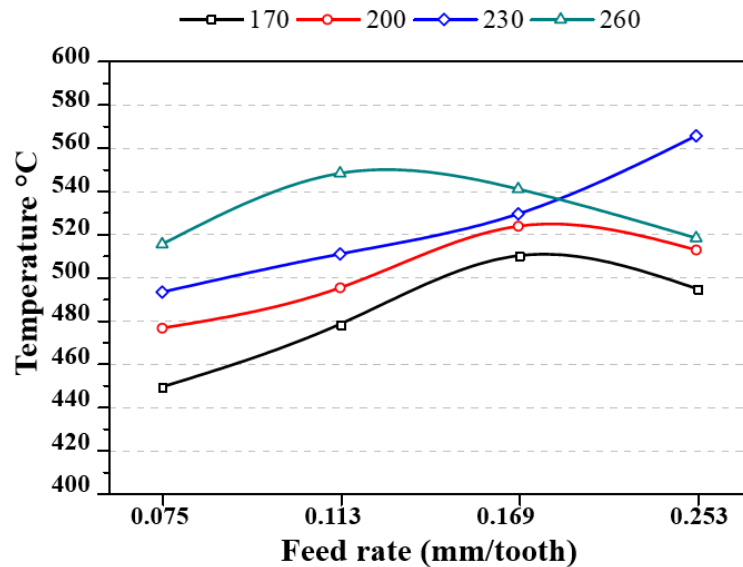


Figure 5. Temperature graph based on feed and cutting speed at 1.5 mm cutting depth

By examining the graph in Figure 5, an increase in temperature values occurred with increasing feed rate and cutting speed. This situation has occurred in accordance with the literature (Usca et al., 2021). According to the graph in Figure 5, the highest temperature value (565.43 °C) is 230 m/min V and 0.253 mm/tooth f, the lowest temperature value (448.98 °C) is 170 m/min V and 0.075 mm/tooth f. There is a change of approximately 20.59% between the highest and lowest temperature values.

#### 4. CONCLUSION

The paper focused on the machinability of AISI P20 steel with the milling was investigated by evaluating the temperatures and cutting forces in the course of the process using the FEM. The results are given below.

- In general, increasing of feed and depth, the temperature and cutting force values also increased.
- The highest cutting force in the simulation results was 1951.42 N, at a cutting depth of 1.5 mm in the Y axis direction, 0.169 mm/tooth f and 170 m/min V. The lowest cutting force value was 36.11 N in the X-axis direction at 1.5 mm cutting depth, 230 m/min V and 0.075 mm/tooth f.
- The lowest temperature value in the simulation results was 448,98 °C at 1.5 mm cutting depth, 0.075 mm/tooth f and 170 m/min V. The highest temperature value was 593.14 °C at 0.75 mm cutting depth, 0.113 mm/tooth f and 170 m/min V.
- It has been concluded that milling with the FEM can be used for the estimation of machinability outputs.
- In the FEM, studies can be conducted on the analysis of process outputs such as moment and chip formation of different processes, materials and machining parameters with cutting tools.
- Comparison of machinability criteria can be made by using different finite element programs for machining operations.

#### 5. CONFLICT OF INTEREST

Authors approve that to the best of their knowledge, there is not any conflict of interest or common interest with an institution/organization or a person that may affect the review process of the paper.

#### 6. AUTHOR CONTRIBUTION

Rüstem BİNALİ has the full responsibility of the paper about determining the concept of the research, data collection, data analysis and interpretation of the results, preparation of the manuscript and critical analysis of the intellectual content with the final approval.

#### 7. REFERENCES

- ASTM, 2022. P20 Steel Plate, <https://www.astmsteel.com/product/p20-steel-plate-1-2311-3cr2mo-mold-tool-steel/> (Date of access: 05.04.2022)
- Binali R., Sıcak iş takım çeliğinin (TOOLOX 44) işlenebilirliğinin incelenmesi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Master Thesis (Printed), 2017.
- Binali R., Coşkun, M., Neşeli, S., An Investigation of Power Consumption in Milling AISI P20 Plastic Mold Steel By Finite Elements Method. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* (34), 513-518, 2022.
- Binali R., Yaldız, S., Neseli, S., Parametric optimization for machinability parameters of S960QL structural steel during milling by finite elements. *Selcuk University Journal of Engineering Sciences* 21(1), 26-31, 2022.
- Binali R., Yaldız, S., Neşeli, S., S960QL Yapı Çeliğinin İşlenebilirliğinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* (31), 85-91, 2021.



- Chinchanikar S., Choudhury S., Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: An optimization approach. *Measurement* 46(4), 1572-1584, 2013.
- Demir H., Ulaş H. B., Binali R., Toolox 44 malzemesinde talaş kaldırma miktarının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Technological Applied Sciences* 13(1), 19-28, 2018.
- Galanis N., Manolakos D. E., Finite element analysis of the cutting forces in turning of femoral heads from AISI 316l stainless steel. In *Proceedings of the World Congress on Engineering (Vol. 2)*, 2014.
- Ghani J. A., Choudhury I., Hassan H., Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. *Journal of Materials Processing Technology* 145(1), 84-92, 2004.
- Gok K., Development of three-dimensional finite element model to calculate the turning processing parameters in turning operations. *Measurement* 75, 57-68, 2015.
- Günay M., Meral T., Korkmaz M. E., AISI 420 Martenzitik paslanmaz çeliğin delinebilirliğinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 4(3), 223-229, 2018.
- Günay M., Yaşar N., Sekmen M., Korkmaz M. E., AISI P20 çeliğinin işlenmesinde kesme kuvvetinin deneysel ve nümerik analizi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology* 4(1), 13-19, 2016.
- Korkmaz M. E., Günay M., Finite element modelling of cutting forces and power consumption in turning of AISI 420 martensitic stainless steel. *Arabian Journal for Science and Engineering* 43(9), 4863-4870, 2018.
- Kuntoğlu M., Acar O., Gupta M. K., Sağlam H., Sarikaya M., Giasin K., Pimenov D. Y., Parametric optimization for cutting forces and material removal rate in the turning of AISI 5140. *Machines* 9(5), 90, 2021.
- Kuntoğlu M., Aslan A., Sağlam H., Pimenov D. Y., Giasin K., Mikolajczyk T., Optimization and analysis of surface roughness, flank wear and 5 different sensorial data via tool condition monitoring system in turning of AISI 5140. *Sensors* 20(16), 4377, 2020.
- Kuntoğlu M., Sağlam H., Investigation of progressive tool wear for determining of optimized machining parameters in turning. *Measurement* 140, 427-436, 2019.
- Küçüktürk G., Modeling and analyzing the effects of experimentally determined torque and thrust force on cutting tool according to drilling parameters. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 227(1), 84-95, 2013.
- Li B., Zhang S., Zhang Q., Li L., Simulated and experimental analysis on serrated chip formation for hard milling process. *Journal of Manufacturing Processes* 44, 337-348, 2019.
- Ozcelik B., Bagci E., Experimental and numerical studies on the determination of twist drill temperature in dry drilling: A new approach. *Materials & Design* 27(10), 920-927, 2006.
- Ozlu B., Ugur L., Optimization of cutting forces on turning of Ti-6Al-4V Alloy by 3D FEM simulation analysis. *Journal of Engineering Research and Applied Science* 10(2), 1789-1795, 2021.
- Özel T., Computational modelling of 3D turning: Influence of edge micro-geometry on forces, stresses, friction and tool wear in PcBN tooling. *Journal of Materials Processing Technology* 209(11), 5167-5177, 2009.
- Saglam H., Unsacar F., Yaldiz, S., Investigation of the effect of rake angle and approaching angle on main cutting force and tool tip temperature. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46(2), 132-141, 2006.

- Salur E., Understandings the tribological mechanism of Inconel 718 alloy machined under different cooling/lubrication conditions. *Tribology International* 174, 107677, 2022.
- Salur E., Aslan A., Kuntoğlu M., Güneş A., Şahin Ö., Optimization of cutting forces during turning of composite materials. *Acad. Platf. J. Eng. Sci.* 8, 423-431, 2020.
- Shatla M., Kerk C., Altan T., Process modeling in machining. Part I: determination of flow stress data. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41(10), 1511-1534, 2001.
- Ucun İ., Aslantas K., Numerical simulation of orthogonal machining process using multilayer and single-layer coated tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 54(9), 899-910, 2011.
- Usca Ü. A., Uzun M., Kuntoğlu M., Sap E., Gupta M. K., Investigations on tool wear, surface roughness, cutting temperature, and chip formation in machining of Cu-B-CrC composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 116(9), 3011-3025, 2021.
- Zhang J. Z., Chen J. C., Kirby E. D., Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method. *Journal of Materials Processing Technology* 184(1-3), 233-239, 2007.
- Zhang Q., Zhang S., Li J., Three dimensional finite element simulation of cutting forces and cutting temperature in hard milling of AISI H13 steel. *Procedia Manufacturing* 10, 37-47, 2017.

Araştırma Makalesi / Research Article

İlaç-İlaç Etkileşimlerini Keşfetmek: Bir Ağ Analizi ve Görselleştirme Yaklaşımı

İlhan UYSAL<sup>1\*</sup>, Utku KÖSE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6091-9110>, [ilhanuysal@gmail.com](mailto:ilhanuysal@gmail.com)

<sup>2</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9652-6415>, [utkukose@sdu.edu.tr](mailto:utkukose@sdu.edu.tr)

Geliş/ Received: 20.03.2023;

Kabul / Accepted: 07.05.2023

**ÖZET:** Bu makale, ağ analizi ve görselleştirme yoluyla ilaç-ilaç etkileşimlerinin karmaşıklığını araştırmaktadır. İlaç-ilaç etkileşimlerini analiz etmek ve ilaçlar arasındaki ilişkileri keşfederek etkileşimli bir görselleştirme aracı sağlamak için ağ tabanlı bir yaklaşım sunulmaktadır. Ağ tabanlı yaklaşım, büyük bir ilaç-ilaç etkileşimi veri kümesine uygulanmakta ve ortaya çıkan ağın özelliklerini analiz etmektedir. Ayrıca, ilaç-ilaç etkileşimlerinin daha fazla araştırılması için ağ tabanlı yaklaşımın potansiyeli de tartışılmaktadır. Son olarak, ilaçlar arasındaki ilişkileri keşfetmek için etkileşimli bir görselleştirme aracı sağlayarak ağ tabanlı yaklaşımın etkinliği gösterilmektedir. Bu çalışmanın sonuçları, ilaç-ilaç etkileşimlerinin karmaşıklığının daha iyi anlaşılmasını sağlayacağı öngörülmekte ve ilaç keşfi ve geliştirmede ağ analizi ve görselleştirmenin potansiyel uygulamalarını önermektedir. Aynı zamanda kullanıcıların web uygulamasını ziyaret edebilmeleri ve grafiklerle doğrudan etkileşim kurabilmeleri için Pyvis ağ grafiklerini çevrimiçi olarak <https://iuysal1905-streamlit-pyvis-network-app2-91q9sv.streamlit.app> adresinde yayınlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** İlaç-ilaç etkileşimi, Ağ analizi, Görselleştirme.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: [ilhanuysal@gmail.com](mailto:ilhanuysal@gmail.com)

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Uysal, İ., Köse, U. (2023). İlaç-İlaç Etkileşimlerini Keşfetmek: Bir Ağ Analizi ve Görselleştirme Yaklaşımı. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 257-270.

## Exploring Drug-Drug Interactions: A Network Analysis and Visualization Approach

**ABSTRACT:** This article investigates the complexity of drug-drug interactions through network analysis and visualization. A network-based approach is presented to analyze drug-drug interactions and provide an interactive visualization tool by exploring relationships between drugs. The network-based approach is applied to a large drug-drug interaction dataset and the properties of the resulting network are analyzed. The potential of the network-based approach for further exploration of drug-drug interactions is also discussed. Finally, the effectiveness of the network-based approach is demonstrated by providing an interactive visualization tool to discover relationships between drugs. The results of this study are expected to facilitate a better understanding of the complexity of drug-drug interactions and suggest potential applications of network analysis and visualization in drug discovery and development. It has also published Pyvis network graphs online at <https://iuysal1905-streamlit-pyvis-network-app2-91q9sv.streamlit.app> so that users can visit the web application and interact with the graphs directly.

**Keywords:** Drug-drug interaction, Network analysis, Visualization.

### 1. GİRİŞ

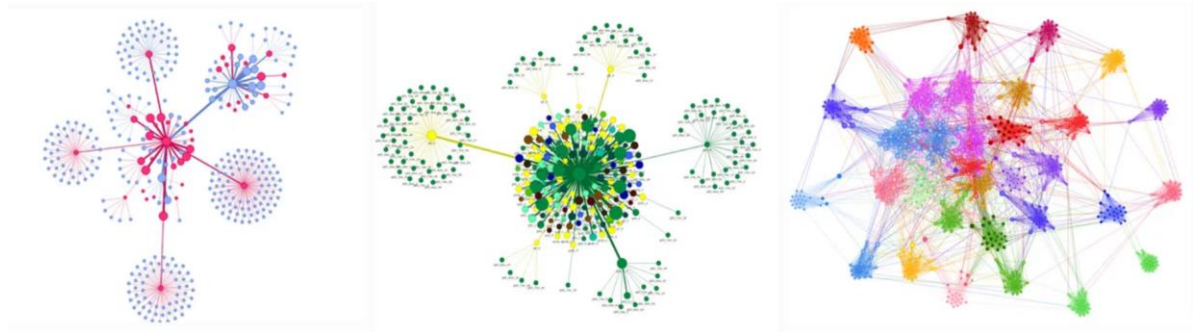
İlaç-İlaç Etkileşimleri (DDI), birlikte alınan iki veya daha fazla ilacın etkilerini ifade etmektedir. İki veya daha fazla ilaç birlikte alındığında, ciddi yan etkilere ve hatta ölüme neden olabilecek şekilde etkileşime girebilirler. Bu etkileşimler, ilaçlar birlikte alındığında veya bir ilaç başka bir ilacın metabolizmasını etkilediğinde meydana gelebilmektedir. Doğru ilaçları, doğru dozlarda ve doğru kombinasyonlarda alındığından emin olmak için ilaç-ilaç etkileşimlerinin potansiyel risklerini anlamak önemlidir.

İlaç-ilaç etkileşimleri, ilaçlardan birinin veya her ikisinin etkinliğinin artmasına veya azalmasına neden olabilir veya beklenmeyen bir şekilde zararlı reaksiyonlara, yan etkilere neden olabilir. Örneğin bir ilaç başka bir ilacın emilimini engelleyerek vücuttaki ilaç miktarının artmasına neden olabilir. Bu, yan etki veya toksisite riskinin artmasıyla sonuçlanabilir. Potansiyel ilaç-ilaç etkileşimlerinin farkında olmak ve bunları doktor ile görüşmek son derece önemlidir. Doktor, ilaçlardan herhangi birinin birbiriyle etkileşime girip girmediğini belirlemeye yardımcı olabilir ve bunların nasıl yönetileceği konusunda tavsiyede bulunabilir. Etiketleri dikkatlice okumak ve herhangi bir ilacı almak için talimatları takip etmek de önemlidir. Potansiyel ilaç-ilaç etkileşimlerinin farkında olarak, ilaçlardan en iyi şekilde yararlanmak kritik bir önem arz etmektedir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde ilaç-ilaç etkileşimlerinin ve analizlerinin farklı yönlerini kapsayan birçok çalışma bulunmaktadır. Tüm bu çalışmalarda ilaç-ilaç etkileşimleriyle ilişkili risklerin kapsamlı değerlendirmelerinin yapılmasının önemi tartışılmıştır. Swapna ve arkadaşları, Amiodarone ve Levofloxacin üzerine DDI çalışmalarının bir incelemesini yapmıştır (Swapna ve ark., 2019). Aзуaje, ilaç etkileşim ağlarını ve bunların potansiyel klinik uygulamalarını tanıtmıştır (Aзуaje, 2013). Correia ve diğerleri, ağ analizi yoluyla potansiyel ilaç etkileşimlerini ve reaksiyonlarını izlemek için Instagram verilerini kullanmışlardır (Correia ve ark., 2016). Zagidullin ve arkadaşları, ilaç kombinasyonlarını araştırmak için kapsamlı bir kaynak sağlamak üzere bir kanser ilacı kombinasyonu veri portalı geliştirmişlerdir (Zagidullin ve ark., 2019). Niu ve arkadaşları, farmakodinamik ilaç-ilaç etkileşimlerini, ilgili mekanizmaları ve bunların ilaç etkinliğini ve güvenliğini nasıl etkileyebileceğini tartışmışlardır (Niu ve ark., 2019). Lin ve arkadaşları, ilaç-ilaç etkileşimlerini tahmin etmek için bir Bilgi Grafiği Sinir Ağı (KGNN) önerirken (Niu ve ark., 2020),

Feng ve arkadaşları, DPDDI adı verilen ilaç-ilaç etkileşimleri analizi için derin öğrenme tabanlı bir tahmin yazılımı geliştirmişlerdir (Feng ve ark., 2020). Van Haarst ve arkadaşları, rifampin ilaç-ilaç etkileşimi çalışmalarındaki son nitrozamin safsızlıkları sorununu ele almıştır (Van Haarst ve ark., 2023). Hauben, ilaç-ilaç etkileşimlerinin farmakovijilansı için yapay zekâ ve veri madenciliğinin kullanımını gözden geçirmiş ve bu araçların ilaç-ilaç etkileşimlerinin tanımlanması ve değerlendirilmesindeki iyileştirme potansiyelini vurgulamıştır (Hauben, 2023). Juhi ve arkadaşları, ChatGPT'nin yaygın ilaç-ilaç etkileşimlerini tahmin etme ve açıklama kapasitesini incelemişler ve ChatGPT'nin ilaç-ilaç etkileşimlerini tahmin etmede etkili olduğunu ve mevcut bilgilerle tutarlı açıklamalar sağladığını ifade etmişlerdir (Juhi, 2023). Zhu ve arkadaşları, ilaç-ilaç etkileşimleri ile akut böbrek hasarı gelişimi arasındaki ilişkiyi araştırmak için korelasyon tabanlı bir ağ analizi gerçekleştirmiş ve belirli ilaç çiftlerinin daha yüksek akut böbrek hasarı riski ile ilişkili olduğunu tespit etmişlerdir (Zhu ve ark., 2023). Vo ve arkadaşları, ilaç-ilaç etkileşimleri tahmininde açıklanabilir yapay zekaya giden yolda sistematik bir inceleme gerçekleştirmiş ve ilaç-ilaç etkileşimlerinin altında yatan mekanizmalar hakkında içgörü sağlayabilecek şeffaf ve yorumlanabilir yapay zekâ modelleri geliştirmenin önemini tartışmışlardır (Vo ve ark., 2022). Al-Rabeah ve Lakizadeh, ilaç-ilaç etkileşimi olaylarını tahmin etmek için çizge sinir ağı tabanlı bir özellik çıkarma yaklaşımı önermiş ve yaklaşımlarının ilaç-ilaç etkileşimlerini tahmin etmede diğer birkaç makine öğrenimi modelinden daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir (Al-Rabeah ve Lakizadeh, 2022).

İlaç-ilaç etkileşimleri, ciddi yan etkilere ve hatta ölüme neden olabildikleri için tıp alanında önemli bir endişe kaynağıdır. İlaç-ilaç etkileşimlerinin karmaşıklığı göz korkutucu olabilse de ağ analizi ve görselleştirme, bunları keşfetmek ve anlamak için güçlü bir araç sağlayabilmektedir. Ağ analizi ve görselleştirme, ilaçlar arasındaki etkileşimlerdeki kalıpları belirlemeye ve gözden kaçmış olabilecek potansiyel ilaç-ilaç etkileşimlerini belirlemeye yardımcı olabilmektedir. Buna ilaveten, ağ analizi ve görselleştirme, ilaç-ilaç etkileşimlerini tahmin etmeye ve önlemeye yönelik stratejiler geliştirmek için kullanılabilir. İlaç-ilaç etkileşimlerinin ağ analizi ile görselleştirilmesi ile ortaya çıkan bazı ağ örnekleri Şekil 1'de verilmiştir. Bu ağlar, düğüm başına veya kenar başına özelleştirilebilir. Düğümlere renkler, boyutlar, etiketler verilebilir. Her grafikte etkileşime girilebilir, düğümlerin ve kenarların sürüklenmesi, üzerine gelinmesi ve seçilmesi sağlanmaktadır. Her grafiğin düzen algoritması, daha büyük grafiklerin işlenmesiyle ilgili denemelere izin vermek için de değiştirilebilmektedir.



Şekil 1. İlaç-ilaç etkileşimleri için ağ örnekleri (Leung, 2021)

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

İlaç-ilaç etkileşimleri, iki veya daha fazla ilacın birbiriyle reaksiyona girerek beklenmeyen zararlı reaksiyonlarla sonuçlanmasıyla ortaya çıkmaktadır. İlaç-ilaç etkileşimleri, çoklu varlıklar arasındaki bağlantıları içerdiği için, bu ilaç etkileşimlerini ağlarla analiz etmenin uygun olacağı öngörülmüştür. Bu çalışmada 'Mendeley Data' web sitesindeki çoklu tip ilaç-ilaç etkileşimlerinin verileri kullanılmıştır (Hui, 2020). Ham veriler, her satırın belirli bir ilaç çifti arasındaki etkileşimi ifade ettiği 122696 satır ve 5 sütundan oluşmaktadır. Python ile birkaç veri ön işleme adımından sonra veri kümesi Şekil 2'deki hale getirilmiştir. Daha sonra birinci ve ikinci sütun olan drug1\_id ve drug2\_id sütunları veri kümesinden çıkartılmıştır. Son veri kümesinde ilaç isimleri ile etkileşim tipi sütunları bulunmaktadır. Burada hangi ilacın hangi ilaç ile nasıl etkileşime girdiği etkileşim tipinde belirtilmektedir. İlaç-ilaç etkileşimleri genellikle farmakokinetik ve farmakodinamik etkileşimler olarak sınıflandırılır. Metabolik etkileşimler, bir ilacın metabolizması başka bir ilacı etkileyerek, ilacın farmakokinetiğini değiştirir. Metabolik etkileşimler, bir ilacın metabolizmasını artırarak (indüksiyon) veya azaltarak (inhibisyon) oluşabilir. Serum konsantrasyon etkileşimi ise bir ilacın serum konsantrasyonunu artırıp diğer ilacın serum konsantrasyonunu azaltarak, ilaçların etkisini değiştiren bir etkileşim türüdür. Bu etkileşim türü, ilaçların metabolizmasını değiştirerek veya böbreklerden atılımlarını etkileyerek ortaya çıkabilir. Bir ilacın serum konsantrasyonu, vücutta ilacın etki gösterme süresi ve şiddetiyle ilgili olarak önemlidir. İki veya daha fazla ilacın aynı zamanda kullanılması, bir ilacın diğerinin metabolizmasını engelleyebilir veya hızlandırabilir. Bu durumda, ilaçların serum konsantrasyonu değişebilir ve bu da ilaçların beklenen etkilerini değiştirebilir veya yan etkilerin ortaya çıkmasına neden olabilir (Büyükokuroğlu ve ark., 2019). Bu nedenle, ilaç-ilaç etkileşimleri, hastaların tedavisi sırasında dikkate alınması gereken önemli bir konudur.

	drug1_id	drug2_id	drug1_name	drug2_name	interaction_type
0	DB00006	DB00346	Bivalirudin	Alfuzosin	serum concentration
1	DB00006	DB13783	Bivalirudin	Acemetacin	risk or severity of bleeding
2	DB00006	DB06605	Bivalirudin	Apixaban	anticoagulant activities
3	DB00006	DB06695	Bivalirudin	Dabigatran etexilate	anticoagulant activities
4	DB00006	DB09075	Bivalirudin	Edoxaban	anticoagulant activities
...	...	...	...	...	...
222691	DB13955	DB14033	Estradiol dienanthate	Acetyl sulfisoxazole	metabolism
222692	DB13956	DB14033	Estradiol valerate	Acetyl sulfisoxazole	metabolism
222693	DB14011	DB14033	Nabiximols	Acetyl sulfisoxazole	metabolism
222694	DB14019	DB14033	Fosnetupitant	Acetyl sulfisoxazole	metabolism
222695	DB14033	DB00532	Acetyl sulfisoxazole	Mephenytoin	metabolism

222696 rows × 5 columns

Şekil 2. İlaç etkileşimleri verilerinin örnek satırları

Çalışmada kullanılan veri setinde, ilaç etkileşimlerinin öneminin sağlanamaması bir dezavantaj olarak düşünülmektedir. Bu sebeple, tüm etkileşimler için "eşit" önem derecesini belirtmek üzere 1 (bir)' lerle doldurulmuş özel bir sütun (ağırlık) eklenmiştir.

Basit bir şekilde bağlı olan nesnelere koleksiyonu ağ olarak tanımlanmaktadır. Varlıklar (düğümler) arasındaki bağlantıları ya da ilişkileri (kenarlar) modellemek için son derece faydalıdır.

Veri setinde, ikili ilaç etkileşimi, iki düğüm (iki ilaç bileşiği) arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. İlaçlar arasında bir dizi yönlendirilmemiş bağlantı olduğu dikkate alındığında, ağların oluşturulması, yönlendirilmesi ve analiz edilmesi için Python paketlerinden NetworkX paketi kullanılmıştır. NetworkX ile ağlar standart ve standart olmayan veri formatlarında yüklenebilir ve depolanabilir, birçok rastgele ve klasik ağ türü oluşturulabilir, ağ yapısı analiz edilebilir, ağ modelleri oluşturulabilir, yeni ağ algoritmaları tasarlanabilir, ağlar çizilebilir ve çok daha fazlası yapılabilir (Hagberg ve ark., 2008). Pandas DataFrame'den bir ağ grafiği nesnesi oluşturulduktan sonra ağ grafiğinin özeti Şekil 3'de verilmiştir. Buna göre Ağın, 222271 belgelenmiş etkileşim (uç) ile toplam 1868 ilaç varlığına (düğüm) sahip olduğu tespit edilmiştir. Ortalama derece yaklaşık 238 bulunmuştur, yani her ilaç ortalama olarak diğer 238 ilaçla etkileşime girmiştir. Ağ yoğunluğu, tüm düğümler bağlı olarak düşünüldüğünde, bir ağdaki potansiyel bağlantıların gerçekte var olan bağlantılara oranını tanımlamaktadır; Sıfır, sıfır kenarlı bir grafiği temsil ederken, bir, tüm düğümlerin birbirine bağlı olduğu tam bir grafiği tanımlamaktadır (Ladd ve ark., 2017). 0,127'lik düşük ağ yoğunluğu beklenen ve mantıklı bir değerdir çünkü çok fazla ilacın birbiriyle etkileşime girmesi beklenmemektedir.

```
Graph named 'Drug Interactions Network' with 1868 nodes and 222271 edges
Network density: 0.12746519339044304
average degree: 237.97751605995717
```

Şekil 3. İlaç etkileşimlerinin yönlendirilmemiş ağ grafiğinden özet sonuçlar

Bir düğümün sahip olduğu bağlantı sayısı düğüm derecesi ile ifade edilmektedir. Ağlarla analiz yapılırken, derece merkeziliği isminde bir kavram ortaya çıkmaktadır. Basitçe ifade etmek gerekirse, bir düğümün merkezi derecesi, sahip olduğu kenar sayısıdır. Bu, 10 etkileşime sahip bir ilaç düğümünün merkezi derecesinin 10 olacağını ifade etmektedir. Her bir düğümün derece merkeziliği hesaplanarak, ilaç etkileşimlerinde en sık yer alan ilk 20 ilaç Şekil 4'te verilmiştir. Buna göre ilaç etkileşimlerinde en fazla bulunan ilacın, düğüm derecesi 1028 olan Amiodaron olduğu tespit edilmiştir. Anti-ritmik bir ilaç olarak sıkça kullanılan Amiodaron, tiroid fonksiyon bozukluğu, yavaş kalp atışı, hepatit, korneada küçük çöküntüler ve ışığa karşı artan hassasiyet gibi bir dizi yan etkiyle ilişkilendirilir (Yakut ve ark., 2017).

```
Top 20 drugs by degree:
('Amiodarone', 1028)
('Nefazodone', 986)
('Phenobarbital', 976)
('Venlafaxine', 969)
('Primidone', 947)
('Phenytoin', 935)
('Fluvoxamine', 933)
('Curcumin', 924)
('Ziprasidone', 920)
('Carbamazepine', 917)
('Fosphenytoin', 916)
('Pentobarbital', 899)
('Verapamil', 878)
('Clozapine', 855)
('Diltiazem', 849)
('Vemurafenib', 842)
('Cyclosporine', 841)
('Pitolisant', 815)
('Stiripentol', 813)
('Rifampicin', 811)
```

Şekil 4. En çok etkileşime giren ilk 20 ilaç ve karşılık gelen düğüm derecesi

## 2.1. Ağ Analizi ve Görselleştirmeye Genel Bakış

Ağlarla çalışmanın en güzel tarafı görselleştirmedir. Bu tarz görselleştirmeleri kolaylıkla oluşturulmasına yardımcı olan, etkileşimli ağ grafikleri meydana getirmesiyle bilinen Pyvis aracıdır. Pyvis aracı, minimum Python koduyla hızlı bir şekilde görsel ağ grafikleri oluşturmak için kullanılan Python kütüphanelerinden biridir.

Ağ analizi ve görselleştirme, çoklu ağlarda özellikleri ve ilişkileri incelemek için kullanılan bir tekniktir. Ağlar, birçok noktayı veya aktörü temsil eden bağlantılar arasındaki ilişkilerin gösterildiği, karmaşık yapılara sahiptir. Ağ analizi ve görselleştirme, bu karmaşık yapıların daha anlaşılabilir hale getirilmesine yardımcı olmaktadır.

Ağ analizi ve görselleştirme, ağların temel özelliklerini ölçmek için kullanılan birtakım teknikleri içermektedir. Bu teknikler arasında, ağlar arasındaki bağlantıların sayısının (bağlanma sayısı) ölçülmesi, ağlar arasındaki bağlantılar arasındaki uzaklıklar ölçülmesi ve aktörler arasındaki ilişkilerin gösterilmesi sayılabilir. Bunun yanı sıra, ağ analizi ve görselleştirmenin kullanabileceği diğer teknikler de mevcuttur.

Ağ analizi ve görselleştirmenin en büyük avantajlarından biri, karmaşık verilerin daha anlaşılabilir hale getirilmesine yardımcı olmasıdır. Görsel olarak sunulmuş veriler, daha kolay anlaşılabilir şekilde sunulmaktadır. Ayrıca, ağ analizi ve görselleştirmenin kullanarak elde edilen sonuçlar, karar verme süreçlerinde kullanmanın daha kolay hale gelmesine yardımcı olur.

## 2.2. İlaç-İlaç Etkileşimlerinin Karmaşıklığını Keşfetmek

İlaç-ilaç etkileşimleri, sağlık hizmetlerinde önemli ve karmaşık bir konudur. İki veya daha fazla ilaç, bir veya her iki ilacın etkinliğini veya toksisitesini etkileyecek şekilde etkileşime girdiğinde ortaya çıkabilir. Bu etkileşimlerin, advers olay riskinde artış ve hatta ölüm dahil olmak üzere ciddi sonuçları olabilir.

Farklı ilaç-ilaç etkileşimleri türlerini anlamak için, bu etkileşimlere yol açabilecek farklı farmakokinetik ve farmakodinamik mekanizmaları anlamak gerekmektedir. Farmakokinetik etkileşimler, ilaçların vücutta emilimini, dağılımını, metabolizmasını ve eliminasyonunu etkileyen etkileşimlerdir. Farmakodinamik etkileşimler, ilaçların istenen etkileri oluşturmak için vücuttaki reseptörlerle nasıl etkileşime girdiğini etkileyen etkileşimlerdir.

Farklı ilaç-ilaç etkileşimleri türlerini anlamanın yanı sıra, ilaç-ilaç etkileşimlerinin ciddiyetini etkileyebilecek çeşitli faktörleri anlamak da önemlidir. Bunlar, hastaya özgü faktörleri (yaş, cinsiyet, genetik ve komorbiditeler gibi), ilaca özgü faktörleri (dozaj, formülasyon ve uygulama yolu gibi) ve çevresel faktörleri (diyet ve yaşam tarzı gibi) barındırmaktadır.

İlaç-ilaç etkileşimlerinin değerlendirilmesi ve yönetimi, büyük önem taşıyan bir konudur. Bu bağlamda, ilaçlar arasındaki etkileşimlerin tespiti ve etkilerinin anlaşılması, güvenli ve etkili tedavi stratejilerinin oluşturulması için gereklidir. Bu, kapsamlı ilaç incelemeleri yoluyla potansiyel ilaç-ilaç etkileşimlerinin belirlenmesini, klinik karar destek araçları aracılığıyla ilaç-ilaç etkileşimleri riskinin değerlendirilmesini ve doz ayarlamaları, ilaç ikameleri veya diğer müdahaleler aracılığıyla ilaç-ilaç etkileşimlerinin yönetilmesini içermektedir.

İlaç-ilaç etkileşimlerinin karmaşıklığını keşfetmek, güvenli ve etkili sağlık hizmeti sağlamanın önemli bir parçasıdır. Sağlık profesyonelleri, farklı ilaç-ilaç etkileşimlerini türlerini, ciddiyetlerini etkileyen faktörleri ve bunların nasıl değerlendirilip yönetileceğini anlayarak, hastaların uygun ilaçları yan etki riski minimum düzeyde olacak şekilde almalarına yardımcı olabilir.



### 2.3. Ağ Analizi ve Görselleştirme Teknikleri

Ağ analizi ve görselleştirme teknikleri, ağların yapısını keşfetmek, analiz etmek ve görselleştirmek için kullanılır. Bu teknikler, bir ağ içindeki farklı ögeler arasındaki ilişkileri daha iyi anlamamıza ve verilerdeki kalıpları ve eğilimleri belirlemeye olanak tanır. Ağ yapılarını anlayarak, bilgilerin bir sistemde nasıl aktığına dair içgörüler elde edebilir, gizli ilişkileri ortaya çıkarabilir ve potansiyel güvenlik açığı alanları belirlenebilmektedir.

Ağ analizi ve görselleştirme teknikleri, sosyal ağ analizi, biyoloji, bilgisayar bilimi, ekonomi ve pazarlama gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Her alanda, bu teknikler bir ağın yapısına ve içinde bilgi alışverişinin nasıl yapıldığına dair fikir edinmek için kullanılabilir. Örneğin, sosyal ağ analizinde bu teknikler, farklı insanların birbirine nasıl bağlı olduğunu ve ağ üzerinden bilginin nasıl aktığını anlamak için kullanılabilir. Biyolojide, bu teknikler gen ağlarını analiz etmek ve gen ekspresyon modellerini belirlemek için kullanılabilir. Bilgisayar biliminde, bu teknikler bir bilgisayar ağının yapısını ve düğümler arasında veri alışverişinin nasıl yapıldığını belirlemek için kullanılabilir.

Ağ analizi ve görselleştirme teknikleri, karmaşık sistemleri daha iyi anlamamıza yardımcı olabilecek güçlü araçlardır. Bu tekniklerden yararlanarak, ağların yapısına ve bunlar içinde bilgi alışverişinin nasıl yapıldığına dair daha derin içgörüler elde edilebilir.

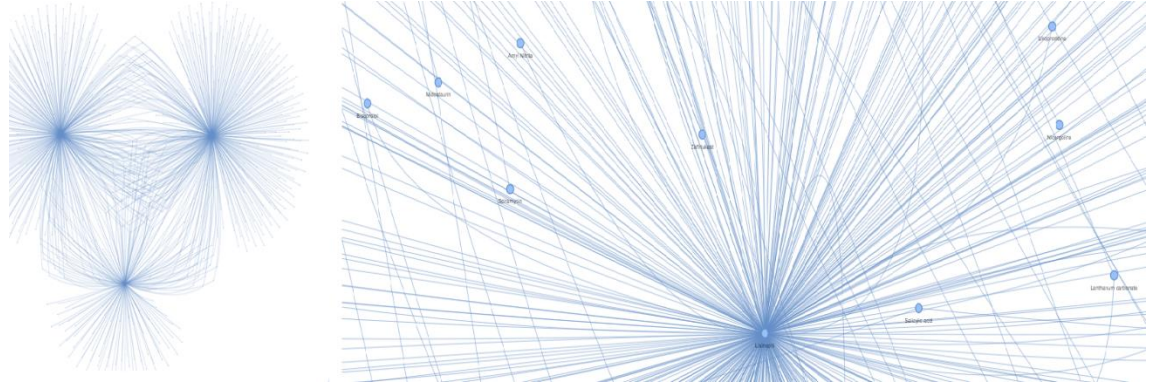
### 2.4. Ağ Analizi ve Görselleştirme Uygulamaları

Ağ analizi ve görselleştirme, karmaşık sistemleri anlamak için güçlü araçlardır. Bir sosyal ağdaki etkili aktörleri belirlemek, farklı veri kaynakları arasındaki anlamlı ilişkileri keşfetmek ve büyük veri kümelerindeki gizli kalıpları ortaya çıkarmak gibi çeşitli sorunlara ilişkin içgörüler elde etmek için kullanılabilirler. Ağ analizi ve görselleştirme, halk sağlığı, ekonomi, sosyoloji, bilgisayar bilimi ve daha fazlasını içeren birçok farklı alana uygulanabilir.

Halk sağlığında, farklı hastalıklar veya sağlık durumları arasındaki ilişkileri ortaya çıkarmak için ağ analizi ve görselleştirme kullanılabilir. Bu, araştırmacıların hastalıkların altında yatan nedenleri anlamalarına ve önleme veya tedavi için stratejiler geliştirmelerine yardımcı olabilir. Ekonomide, farklı ekonomik politikaların bir ülke ekonomisi üzerindeki etkisini anlamak için ağ analizi ve görselleştirme kullanılabilir. Sosyolojide ağ analizi ve görselleştirme, araştırmacıların sosyal ağların yapısını ve içinde bireylerin oynadığı rolleri anlamalarına yardımcı olabilir.

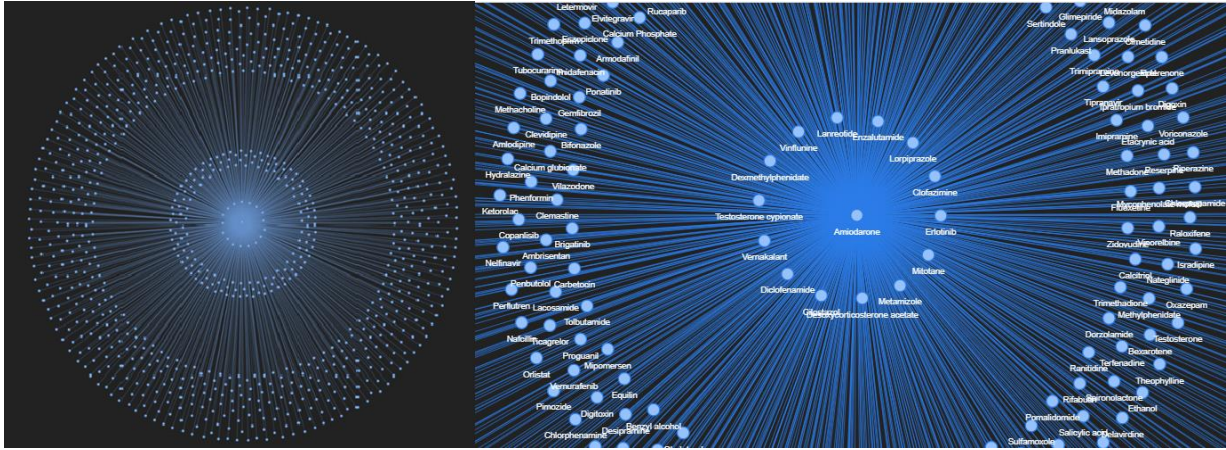
Bilgisayar biliminde ağ analizi ve görselleştirme, bilgisayar ağlarındaki sorunları teşhis etmek, internetteki kötü niyetli aktörleri belirlemek veya büyük veri kümelerinin yapısını görselleştirmek için kullanılabilir. Ağ analizi ve görselleştirme, farklı veri parçaları arasındaki ilişkileri görselleştirmek veya kullanıcıların büyük veri kümelerini sezgisel bir şekilde keşfetmesine olanak tanıyan etkileşimli görselleştirmeler oluşturmak için de kullanılabilir.

Ağ görselleştirmesinin görünümünü yapılandırmak veya değiştirmek için ForceAtlas2Based, Hrepulsion, Repulsion, Barnes Hut gibi pek çok özelleştirme bulunmaktadır. Bu çalışmada The Popular Repulsion Solver ve Barnes Hut Physics modelleri, hiyerarşik olmayan düzenler için en hızlı, varsayılan ve önerilen çözücü oldukları için tercih edilmiştir. Tüm ilaç etkileşimi verileri bir Pyvis Barnes Hut grafiği ile çizdirildiği zaman ortaya çıkan görüntü Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Barnes Hut Physics Modeli ile tam etkileşim veri kümesinin ağ görselleştirilmesi

Grafikleri açıklayıcı ve etkileyici bir şekilde sunabilmek için, veri filtreleme ile daha küçük bir veri seti üzerinde çalışılmış ve daha anlaşılır olacağı için en fazla ilaç etkileşimine sahip olduğu keşfedilen Amiodarone için bir Pyvis ağı (İtme çözücü kullanarak) oluşturularak Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre aşağıdaki görselleştirme, Amiodarone'nin etkileşimde bulunduğu diğer 1028 ilaç varlığı ile çevrili merkezi düğüm olarak sunmaktadır.



Şekil 6. Amiodarone ilaç etkileşimlerinin ağ görselleştirilmesi

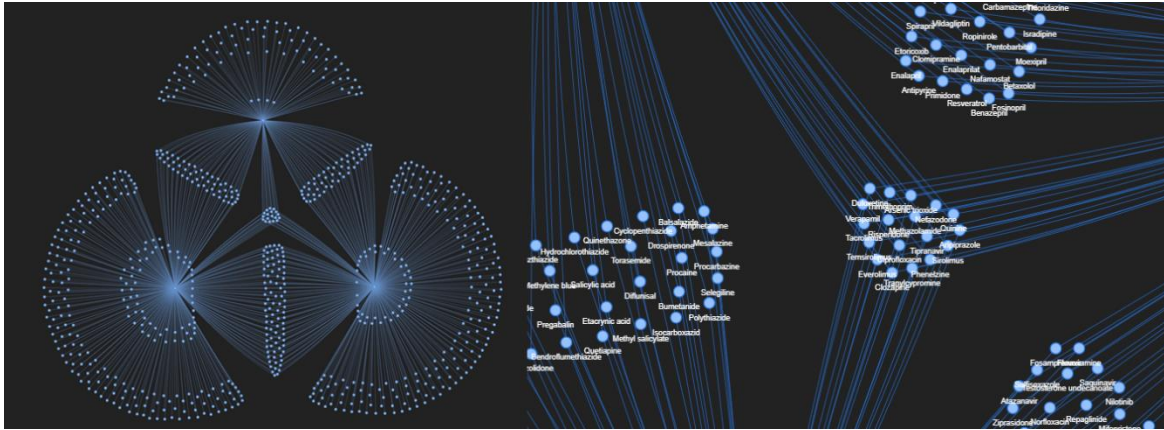
Statik görüntülerin ötesinde, Pyvis gibi Python kitaplıkları, ağ görselleştirme için oldukça etkileşimli grafikler oluşturmaya imkân sağlamaktadır. Bu grafiklerin yerel Jupyter Notebook gibi uygulamalarda ve dosyalarda boşa kalmasına izin vermek yerine, başkalarının etkileşime girmesi için onları çevrimiçi dağıtmak daha anlamlıdır. Pyvis'in önemi, görselleştirmelerin etkileşimli olmasıdır, yani düğümleri yakınlara taşıyarak, işaret etmek için fare (mouse) kullanılmaktadır. Etkileşimli grafikleri deneyimleyebilmek için <https://iuysal1905-streamlit-pyvis-network-app2-91q9sv.streamlit.app/> adresindeki uygulamadan ilaç seçmek yeterli olacaktır. Bu uygulamada basit bir örnek ile ilaç etkileşimleri grafiği gösterilmiş olup ayrıca etkileşim tiplerine ve belirli hastalıklara göre kullanıcı seçim yaparak ilaç etkileşimlerinin ağ görselleştirmesini etkileşimli olarak görebilmektedir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Ağ görselleştirmesinden yararlanırken bazen tek bir ilaca bakmak pozitif sonuçlar ortaya çıkarmayabilir, bu sebeple biraz daha büyük bir veri içeren bir ağ da bu çalışma kapsamında ayrıca incelenmiştir. Sırasıyla diyabet, hipertansiyon ve hiperlipidemi gibi yaygın hastalıklardaki kritik

rollerine dayanarak daha fazla araştırma yapmak için üç ilaç Metformin, Lisinopril ve Simvastatin seçilmiştir. Metformin, Lisinopril ve Simvastatin ilaçlarından en az birini kapsayan etkileşimleri görmek için veriler filtrelendikten sonra ortaya çıkan grafik Şekil 7’de verilmiştir.

Metformin, Lisinopril ve Simvastatin ile ortak etkileşimleri olan farklı ilaçlar ağ grafiğinden kolaylıkla tespit edilebilmektedir. Bu ağ grafiği etkileşimli olduğu için ilaç etkileşimlerini keşfetmek de eğlenceli bir hal almaktadır. Grafikler ayrıntılı bir şekilde incelendiğinde, 222296 ilaçtan seçilen üç ilaç (Metformin, Lisinopril ve Simvastatin) ile de etkileşimde bulunan (yani kenarları olan) 17 ilaç tespit edilmiş ve Çizelge 1’de isimleri ile açıklamaları verilmiştir. Buna göre diyabet, hipertansiyon ve hiperlipidemi hastalıkları için kullanılan Metformin, Lisinopril ve Simvastatin ilaçlarının üçü ile de etkileşim gösteren ilaçlar arasında Methazolamide, Aripiprazole, Arsenic trioxide, Duloxetine, Verapamil, Tranlycypromine, Clozapine, Ciproflaxacin, Nefazodone, Phenelzine, Trimethoprim, Tipranavir, Risperidone, Everolimus, Sirolimus, Tacrolimus ve Temsirolimus yer almaktadır. Bu ilaçlar arasında, bipolar bozukluk, depresif bozukluk, şizofreni, HIV enfeksiyonu, glokom, mesane enfeksiyonu, hiperkalemi, organ nakli reddi ve renal hücreli karsinom gibi birçok hastalığın tedavisinde kullanılmaktadırlar.



Şekil 7. Metformin, Lisinopril ve Simvastatin içeren ilaç etkileşimlerinin ağ görselleştirilmesi

Çizelge 1. Metformin, Lisinopril ve Simvastatin ile etkileşime giren ilaçlar ve açıklamaları

İlaç İsmi	İlaç Açıklaması
Methazolamide	Belirli tipte glokomlu (göz tansiyonu) kişilerde göz içindeki basıncı (göz içi basıncı) düşürmek için kullanılmaktadır. (Jiang ve ark., 2017)
Aripiprazole	Şizofreni ve bipolar bozukluk tedavisinde önerilmekte ve kullanılmaktadır. (Korkmaz ve ark., 2015)
Arsenic trioxide	Son 17 yılda, dünya çapında yürütülen klinik deneyler, tekrarlayan akut promiyelositik lösemnin (APL) tedavisinde arsenik trioksitin ( $As_2O_3$ ) etkinliğini göstermiştir (Emadi ve Gore, 2010).
Duloxetine	Majör depresif bozukluğunu tedavi etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Qin ve ark., 2023).
Verapamil	Hipertansiyon tedavisinde kullanılan Amerika Birleşik Devletleri Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) onaylı bir ilaçtır (Kim ve ark., 2023).

Tranlycypromine	Depresif bozukluğun tedavisinde kullanılan ilaçlardan biridir (Shrestha ve Banga, 2022).
Clozapine	Psikiyatrik bir ilaç olup zihinsel bozuklukları tedavi etmek için kullanılmaktadır, ayrıca intihar ve kendine zarar verme davranışlarını azaltabilmektedir (Pruette ve ark., 2023).
Ciproflaxacin	Geniş spektrumlu bir antibiyotik olup çeşitli enfeksiyonların ve bakteri kaynaklı hastalıkların tedavisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Nwabuife ve ark., 2022).
Nefazodone	Zihinsel bozuklukları tedavi etmek için kullanılan antidepresan bir ilaçtır (Kumar ve Jalaluddin, 2022).
Phenelzine	Anksiyolitik özelliklere sahip bir antidepresandır (Matveychuk ve ark., 2022).
Trimethoprim	Hiperkalemiye (kandaki potasyum seviyesinin olması gerektiğinden daha yüksek seviyede olması) neden olabilen (Faré ve ark., 2022) ve mesane enfeksiyon tedavisinde kullanılan dünya çapındaki en yaygın beş antibiyotikten biridir (Annamalai ve Shin, 2022).
Tipranavir	HIV enfeksiyonunu tedavi etmek için kullanılmaktadır (Ezeh ve ark., 2022).
Risperidone	Şizofreni ve bipolar tedavisinde kullanılmaktadır (Kotzeva ve ark., 2023).
Everolimus	İmmünsüpresif bir ilaç olan Everolimus, nakil alıcılarında organ reddini önlemek için kullanılmaktadır (Tedesco-Silva ve ark., 2022).
Sirolimus	Özellikle organ nakli reddini engellemek için kullanılmaktadır (Zuccato ve ark., 2022).
Tacrolimus	Özellikle organ nakli reddini engellemek için kullanılmaktadır (Brunet ve Pastor-Anglada, 2022).
Temsirolimus	Sirolimusun bir türevi ve ön ilacı olup bir tür böbrek kanseri olan renal hücreli karsinom tedavisinde kullanılmaktadır (Farley ve ark., 2022).

İlaç-ilaç etkileşimleri, hasta güvenliği ve sağlık sonuçları üzerinde ciddi etkileri olabileceğinden, sağlık sektöründe önemli bir sorundur. Mevcut ilaçların sayısı arttıkça, ilaç-ilaç etkileşimlerinin karmaşıklığı da artmaktadır. İlaç-ilaç etkileşimlerinin karmaşıklığını daha iyi anlamak ve keşfetmek için ağ analizi ve görselleştirmeyi kullanmak önemli bir avantaj olarak görülmektedir.

Ağ analizi, ilaç-ilaç etkileşimleri gibi karmaşık sistemleri anlamak için güçlü bir araçtır. İlaç-ilaç etkileşimlerini bir ağ olarak temsil ederek, farklı ilaçlar arasındaki kalıpları ve ilişkileri

belirlemek mümkündür. Ağın görselleştirilmesi, potansiyel ilaç hedeflerinin belirlenmesinin yanı sıra önemli düğümlerin ve bağlantıların belirlenmesine de yardımcı olabilmektedir.

Görselleştirme, ağ analizinin önemli bir parçasıdır. Ağı görselleştirmek, verileri anlamlandırmaya yardımcı olmakta ve ilaç-ilaç etkileşimlerinin karmaşıklığına ilişkin öngöründe bulunmaktadır. Görselleştirme, ağın daha fazla araştırma gerektiren alanlarını belirlemek için de kullanılabilir. Görselleştirme, ağın daha fazla araştırma gerektiren alanlarını belirlemek için de kullanılabilir. Ağ analiz ederek, benzer etkilere sahip olan ve belirli bir durumu tedavi etmek için kombinasyon halinde kullanılabilir ilaçları belirlemek mümkündür.

#### 4. SONUÇ

İlaç-ilaç etkileşimlerinin karmaşıklığını keşfetmek için ağ analizi ve görselleştirme kullanımının, ilaçlar ve bunların vücut üzerindeki etkileri arasındaki karmaşık ilişkileri anlamak için güçlü bir araç olduğu kanıtlanmıştır. Ağ analizi ve görselleştirme, verilerin görsel bir sunumunu sağlayarak, araştırmacıların ve klinisyenlerin potansiyel ilaç etkileşimlerini belirlemesine ve ilaç-ilaç etkileşimlerinin hasta sonuçları üzerindeki etkilerini daha iyi anlamalarına yardımcı olabilir. Bu yaklaşım, potansiyel biyobelirteçleri ve terapötik hedefleri belirlemek için de kullanılabilir ve ilaç keşfi ve geliştirmesi için değerli bir kaynak sağlar. Nihayetinde ağ analizi ve görselleştirme, hasta güvenliğini artırmak ve terapötik sonuçları optimize etmek için kullanılabilir.

İlaç-ilaç etkileşimleri, sağlık sektöründe ciddi bir sorundur ve hasta güvenliği ile sağlık sonuçları üzerinde olumsuz etkilere sahip olabilir. Bu nedenle, ilaç-ilaç etkileşimlerinin karmaşıklığını anlamak ve keşfetmek için ağ analizi ve görselleştirme kullanmak önemli bir avantajdır. Ağ analizi, ilaç-ilaç etkileşimlerinin karmaşık sistemlerini anlamak için güçlü bir araçtır. İlaç-ilaç etkileşimlerini bir ağ olarak temsil ederek, farklı ilaçlar arasındaki kalıpları ve ilişkileri belirlemek mümkündür. Ağın görselleştirilmesi, potansiyel ilaç hedeflerinin belirlenmesinin yanı sıra önemli düğümlerin ve bağlantıların belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Görselleştirme, ağ analizinin önemli bir parçasıdır. Ağı görselleştirmek, verileri anlamlandırmaya yardımcı olmakta ve ilaç-ilaç etkileşimlerinin karmaşıklığına ilişkin öngöründe bulunmaktadır. Görselleştirme, ağın daha fazla araştırma gerektiren alanlarını belirlemek için de kullanılabilir. Bu çalışmada sunulan ağ analizi ve görselleştirme yaklaşımı, belirli bir durumu tedavi etmek için kullanılabilir potansiyel ilaç kombinasyonlarını belirlemek için de kullanılabilir. Ağ analiz ederek, benzer etkilere sahip olan ve belirli bir durumu tedavi etmek için kombinasyon halinde kullanılabilir ilaçları belirlemek mümkündür. Sonuç olarak, ilaç-ilaç etkileşimleri karmaşık bir problem olmasına rağmen, ağ analizi ve görselleştirme gibi teknolojilerle çözülebilecek bir problem olduğu öngörülmektedir. Bu yaklaşım, ilaç etkileşimleri hakkında daha fazla bilgi edinmek ve hastaların güvenliği ve sağlık sonuçları üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirmek için sağlık sektörü için önemli bir araçtır.

Bu çalışmadaki sistem, ilaç-ilaç etkileşimlerini anlamak için kullanılan ağ analizi ve görselleştirme yöntemlerini kullanarak potansiyel ilaç kombinasyonlarını belirleyebilir. Bu potansiyel ilaç kombinasyonları, veri madenciliği veya yapay zekâ algoritmaları gibi diğer teknolojiler tarafından kullanılabilir. Örneğin, veri madenciliği algoritmaları, büyük miktarda ilaç-ilaç etkileşimi verisini analiz ederek, ilaç kombinasyonlarının etkililiğini veya yan etkilerini tahmin edebilir. Bu veriler ayrıca yapay zekâ algoritmaları tarafından kullanıldığında belirli bir hastalığı tedavi etmek için en iyi ilaç kombinasyonu belirlenebilir. Bu nedenle, ilaç-ilaç etkileşimleri üzerine

yapılan ağ analizi ve görselleştirme çalışmaları, diğer teknolojiler için önemli bir kaynak olabilir ve potansiyel olarak daha iyi tedavilerin geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

Çalışmanın sınırlılık olan görülen bir yanı olduğu düşünülmektedir. İlaç etkileşimlerinin farklı şiddet dereceleri (küçük, orta, büyük vb.) bulunmaktadır. Bu durum, veri eksikliği nedeniyle açıklanamamıştır. Kenarların değişen şiddeti yansıtacak şekilde çeşitli değerlerinin olması için bu veriyi bulup dahil etmek gerekecektir. Gelecek çalışmalarda bu durum göz önüne alındığı zaman daha güzel sonuçlar ve çalışmalar ortaya çıkacağı düşünülmektedir.

## 5. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## 6. YAZAR KATKISI

Utku KÖSE çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, son onay ve tam sorumluluk kısmında, İlhan UYSAL ise veri toplama, veri analizi, yorumlama, son onay ve tam sorumluluk kısmında katkıda bulunmuşlardır.

## 7. KAYNAKLAR

- Al-Rabeah M. H., Lakizadeh A. Prediction of drug-drug interaction events using graph neural networks based feature extraction. *Scientific Reports*, 12(1), 15590, 2022.
- Annamalai S., Shin W. S. Efficient degradation of trimethoprim with ball-milled nitrogen-doped biochar catalyst via persulfate activation. *Chemical Engineering Journal*, 440, 135815, 2022.
- Aric A. Hagberg, Daniel A. Schult and Pieter J. Swart, "Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX", in *Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy2008)*, Gäel Varoquaux, Travis Vaught, and Jarrod Millman (Eds), (Pasadena, CA USA), pp. 11–15, 2008.
- Azuaje F. Drug interaction networks: an introduction to translational and clinical applications. *Cardiovascular research*, 97(4), 631-641, 2013.
- Brunet M., Pastor-Anglada M. Insights into the Pharmacogenetics of Tacrolimus Pharmacokinetics and Pharmacodynamics. *Pharmaceutics*, 14(9), 1755, 2022.
- Büyükokuroğlu M. E., Tanyeri P., Keleş R. İlaç-ilaç etkileşimleri konusunda farkındalık. *Online Türk Sağlık Bilimleri Dergisi*, 4(3), 377-391, 2019.
- Correia R. B., Li L., Rocha L. M. Monitoring potential drug interactions and reactions via network analysis of instagram user timelines. In *Biocomputing 2016: Proceedings of the Pacific Symposium*, 492-503, 2016.
- Emadi A., Gore S. D. Arsenic trioxide—an old drug rediscovered. *Blood reviews*, 24(4-5), 191-199, 2010.
- Ezeh M. I., Okonkwo O. E., Okpoli I. N., Orji C. E., MODOZIE B. U., Onyema A. C., Ezebuo F. C. Chemoinformatic Design and Profiling of Derivatives of Dasabuvir, Efavirenz, and Tipranavir as Potential Inhibitors of Zika Virus RNA-Dependent RNA Polymerase and Methyltransferase. *ACS omega*, 7(37), 33330-33348, 2022.

- Faré P. B., Memoli E., Treglia G., Bianchetti M. G., Milani G. P., Marchisio P., Janett S. Trimethoprim-associated hyperkalaemia: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 77(10), 2588-2595, 2022.
- Farley J. H., Brady W. E., O'Malley D., Fujiwara K., Yonemori K., Bonebrake A., Gershenson D. M. A phase II evaluation of temsirolimus with carboplatin and paclitaxel followed by temsirolimus consolidation in clear cell ovarian cancer: An NRG oncology trial. *Gynecologic Oncology*, 167(3), 423-428, 2022.
- Hauben M. Artificial Intelligence and Data Mining for the Pharmacovigilance of Drug-Drug Interactions. *Clinical Therapeutics*, 2023.
- Jiang M., Yang F., Zhang L., Xu D., Jia Y., Cheng Y., Xing Q. Unique motif shared by HLA-B\* 59: 01 and HLA-B\* 55: 02 is associated with methazolamide-induced Stevens-Johnson syndrome and toxic epidermal necrolysis in Han Chinese. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 36(6), 873-880, 2022.
- Juhi A., Pipil N., Santra S., Mondal S., Behera J. K., Mondal H., Behera IV, J. K. The capability of ChatGPT in predicting and explaining common drug-drug interactions. *Cureus*, 15(3), 2023.
- Kim D. K., Han D., Bae J., Kim H., Lee S., Kim J. S., Park H. W. Verapamil-loaded supramolecular hydrogel patch attenuates metabolic dysfunction-associated fatty liver disease via restoration of autophagic clearance of aggregated proteins and inhibition of NLRP3. *Biomaterials Research*, 27(1), 1-21, 2023.
- Korkmaz S., Yıldız S., Demir C. F., Sünbül Z. E., Korucu T., Gündoğan B. Aripiprazole Bağlı Akut Distonik Reaksiyon. *Fırat Üniversitesi Sağlık Bilimleri Tıp Dergisi*, 29(2), 91-92, 2015.
- Kotzeva A., Mittal D., Desai S., Judge D., Samanta K. Socioeconomic burden of schizophrenia: a targeted literature review of types of costs and associated drivers across 10 countries. *Journal of medical economics*, 26(1), 70-83, 2023.
- Kumar D. A., Jalaluddin D. How To Manage Dental Anxiety And Fear Among Paediatric Patients. *International Journal of Current Science (IJCS PUB)*. Volume 12, Issue 4 December 2022 | ISSN: 2250-1770, 2022.
- Ladd J., Otis J., Warren C. N., Weingart S. Exploring and analyzing network data with Python. *Programming Historian*, 6, 2017.
- Leung K. Network Analysis and Visualization of Drug-Drug Interactions. 2021, 8 Mart 2023 tarihinde <https://towardsdatascience.com/network-analysis-and-visualization-of-drug-drug-interactions-1e0b41d0d3df> adresinden erişildi.
- Lin X., Quan Z., Wang Z. J., Ma T., Zeng X. KGNN: Knowledge Graph Neural Network for Drug-Drug Interaction Prediction. In *IJCAI Vol. 380*, 2739-2745, 2020.
- Matveychuk D., MacKenzie E. M., Kumpula D., Song M. S., Holt A., Kar, S., Baker G. B. Overview of the neuroprotective effects of the MAO-inhibiting antidepressant phenelzine. *Cellular and Molecular Neurobiology*, 1-18, 2022.
- Niu J., Straubinger R. M., Mager D. E. Pharmacodynamic drug-drug interactions. *Clinical Pharmacology & Therapeutics*, 105(6), 1395-1406, 2019.
- Nwabuife J. C., Omolo C. A., Govender T. Nano delivery systems to the rescue of ciprofloxacin against resistant bacteria "E. coli; P. aeruginosa; Saureus; and MRSA" and their infections. *Journal of Controlled Release*, 349, 338-353, 2022.
- Pruette M. E., Zarzar T. R., Sheitman B. B. Expanding clozapine use in state prisons: a review of the North Carolina experience. *Journal of correctional health care*, 2023.

- Qin X., Xie C., Hakenjos J. M., MacKenzie K. R., Boyd S. R., Barzi M., Li F. The roles of Cyp1a2 and Cyp2d in pharmacokinetic profiles of serotonin and norepinephrine reuptake inhibitor duloxetine and its metabolites in mice. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 181, 106358, 2023.
- Shrestha N., Banga A. K. Development and evaluation of transdermal delivery system of tranylcypromine for the treatment of depression. *Drug Delivery and Translational Research*, 1-11, 2022.
- Swapna G., Pravallika B., Poojitha J. A Review on Drug-drug interaction studies on Amiodarone and Levofloxacin. *Research journal of Pharmacology and Pharmacodynamics*, 11(4), 147-152, 2019.
- Tedesco-Silva H., Saliba F., Barten M. J., De Simone P., Potena L., Gottlieb J., Pascual J. An overview of the efficacy and safety of everolimus in adult solid organ transplant recipients. *Transplantation Reviews*, 36(1), 100655, 2022.
- Van Haarst A., Smith S., Garvin C., Benrimoh N., Paglialunga S. Rifampin drug–drug–interaction studies: reflections on the nitrosamine impurities issue. *Clinical Pharmacology - Therapeutics*, 113(4), 816-821, 2023.
- Vo T. H., Nguyen N. T. K., Kha Q. H., Le N. Q. K. On the road to explainable AI in drug-drug interactions prediction: A systematic review. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 2022.
- Yakut K., Erdoğan İ., Daldaban B. Amiodarona Bağlı Nadir Görülen Bir Komplikasyon; Şiddetli Karın Ağrısı. *Türkiye Çocuk Hastalıkları Dergisi*, 11(1), 69-71, 2017.
- Yu Hui. “Data of multiple-type drug-drug interactions”, *Mendeley Data*, V1, doi: 10.17632/md5czfsfd.1, 2020.
- Zagidullin B., Aldahdooh J., Zheng S., Wang W., Wang Y., Saad J., Tang J. DrugComb: an integrative cancer drug combination data portal. *Nucleic acids research*, 47(W1), W43-W51, 2019.
- Zhu W., Barreto E. F., Li J., Lee H. K., Kashani K. Drug-drug interaction and acute kidney injury development: A correlation-based network analysis. *Plos one*, 18(1), e0279928, 2023.
- Zuccato C., Cosenza L. C., Zurlo M., Gasparello J., Papi C., D’Aversa E., Gambari R. Expression of  $\gamma$ -globin genes in  $\beta$ -thalassemia patients treated with sirolimus: results from a pilot clinical trial (Sirthalacilin). *Therapeutic Advances in Hematology*, 13, 20406207221100648, 2022.



**Araştırma Makalesi / Research Article**

**Çok Fonksiyonlu Akıllı Masa Saati**

Mehmet YUMURTACI\*

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8528-9672>, mehmetyumurtaci@aku.edu.tr

**Geliş/ Received:** 30.03.2023;

**Kabul / Accepted:** 15.05.2023

**ÖZET:** Her türlü kullanıcıya hitap edecek ara yüz ile kullanım kolaylığı sağlayan fonksiyonel bir akıllı masa saati bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Akıllı masa saati zamanı analog/dijital göstermenin yanında sıcaklık, nem, hava kalitesi gibi bulunduğu ortamla ilgili kullanıcıya bilgi vermektedir. Sensörlerden gelen verilerin sınır değerlerin dışına çıkması durumunda sesli ikaz vermenin yanında TFT ekranda da durumun ayrıntılı bilgisi gösterilmektedir. FM radyo ve MP3 modülleri sayesinde dijital bir radyo ile MP3 çaların birçok özelliği akıllı masa saatinde bulunmaktadır. RTC modülü ve batarya kullanımıyla elektrik kesintisi durumunda ayar gerektirmeden saat, gün, ay ve yıl bilgisi TFT ekranda kullanıcıya sunulmaktadır. Hastalar için oluşturulan ilaç takip ara yüzü ile ayarlanan ilaç kullanım zamanları sesli ikaz ile kullanıcıya bildirilmekte, onay alınmaması durumunda bu bilgi SD karttaki ilgili dosyada kayıt altına alınmaktadır. Gerek hasta gerekse ilaçlar için ortam sıcaklık ve nem parametreleri sürekli kontrol edilmektedir. Görme engeli veya zorluğu olan bireyler için bluetooth modülü ile TFT ekrandan yapılacak çoğu işlemin Android işletim sistemine sahip bir cep telefonu/tablet vasıtasıyla sesli olarak yapılabilmesi imkânı sunulmaktadır. Akıllı masa saati modüler bir yapıya sahip olduğundan yazılımında güncelleme yapılarak yeni donanımlar kolayca eklenebilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Akıllı saat, Arduino, Modül, İzleme, Ortam

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: mehmetyumurtaci@aku.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Yumurtacı, M. (2023). Çok Fonksiyonlu Akıllı Masa Saati. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 271-285.

## Multifunctional Smart Table Clock

**ABSTRACT:** A functional smart clock that provides ease of use with an interface for all users has been realized in this study. Besides displaying time as analog/digital, the smart clock gives information to users about the environment such as temperature, humidity and air quality. In case the sensors' data is out of the limit values, detailed situation information is also shown on the TFT screen besides giving an aural warning. Many features of a digital radio and MP3 player are available in the smart clock with FM radio and MP3 modules. With the use of RTC module and battery, time, day, month, and year information is presented to the user on the TFT screen without to need any adjustment in case of blackout. With a drug tracking interface created for patients, set usage times are notified to the user with an aural warning, and if approval is not received, this information is recorded in the relevant file on SD card. Ambient temperature and humidity parameters are kept under constant control for both patients and drugs. For people that blind or have visual impairments, the Bluetooth module provides an opportunity to perform most operations on TFT screen with a voice via a mobile phone/tablet with an Android operation system. Since smart clock has a modular structure, new hardware can be easily added by updating its software.

**Keywords:** Smart clock, Arduino, Module, Monitoring, Environment

### 1. GİRİŞ

Günümüzde saatler zamanı göstermenin yanında kullanıcıya birçok ek fonksiyon sunmaktadır. Khan ve ark. (2012) iki adet PIC mikro kontrolör, RTC modülü, LM35 ve yedi parçalı gösterge kullanarak zamanı, tarihi ve sıcaklığı gösteren düşük maliyetli akıllı çok amaçlı dijital saat tasarlamışlardır. Sundaresan ve ark. (2014) Atmega8A mikro kontrolör ve DS1307 RTC tabanlı düşük maliyetli akıllı uzaktan kontrol edilebilen dijital saati dizayn etmişlerdir. Akıllı saat zamanı, tarihi, sıcaklığı ve ışık şiddetini LCD'de gösterdiği gibi gece lambası, bazer sesi ve yangın sensörü özelliğine de sahiptir. Gerekli ayarlamalar saat üzerindeki butonlar ve uzaktan kumanda ile yapılabilmektedir. Drabek ve ark. (2016) hareket sensörü ile toplanan vücut hareket bilgilerini kullanarak uyku kalitesini belirleyen akıllı bir Arduino alarm saati tasarlamışlardır. Uyku evrelerinin belirlenmesinde hareket sensörü bilgisinin yanında sıcaklık, nem ve aydınlık seviyesi bilgilerini de kullanmışlardır. Kumar ve ark. (2018) kişiyi uyandırmak için gün doğumu simülasyonu yapan, kahve aroması üreten, kullanıcının seçtiği müziğin tonunu arttırarak çalan, hava tahmin bilgileri veren, hatırlatıcıları ayarlama imkânı sunan Arduino Uno tabanlı bir akıllı çalar saatin yapımı ve çalışması için yeni bir yöntem önermişlerdir. Nesnelerin internetinin uygulandığı akıllı duvar saati zamanı göstermenin yanında wi-fi modülü üzerinden internete bağlanarak evin güvenliğini de sağlamaktadır. Saate entegre edilmiş mikrodalga radar sensörü sayesinde kimliği doğrulanmamış kişinin hareketi algılanarak önceden tanımlanmış adreslere/kişilere durumla ilgili anında bilgi verilmektedir (Thakur ve ark., 2020). Wen ve Zheng (2021) AT89S52 tek çip mikro bilgisayar, DS12C887 saat çipi, 2x16 LCD ve DS18B20 sıcaklık sensörü kullanarak zamanı, tarihi ve sıcaklığı gösteren yüksek performanslı akıllı saat tasarlamışlardır. Mandula ve ark. (2015) ev otomasyonuna yönelik olarak yaptıkları çalışmada Arduino Uno kartına bağlı olan elektrikli cihazları bluetooth ve ethernet modülleri aracılığıyla cep telefonuyla kontrol etmişlerdir. Husain ve ark. (2016) havadaki zararlı gaz ve toz miktarını bluetooth modülü üzerinden cep telefonuna göndererek takibini yapabildiği bilgisayarda da izlenebilen bir sistem tasarlamışlardır. Ahasan ve ark. (2018) Arduino tabanlı hava kalitesi sensörü kullanan hava kirliliğinin tespiti üzerine gerçek zamanlı sistem tasarlamışlardır. Saon ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada Arduino Mega kontrol kartı ve DHT11 sensörünü kullanarak ilaç

deposunun sıcaklık ve nem seviyesini ölçmüşlerdir. Ölçülen veriyi XBee modülü üzerinden transfer eden kablosuz veri toplama sistemi geliştirmişlerdir. Öter ve ark. (2016) taşınabilir bir parmak ucu nabız ölçer cihazını PIC16F877 mikrodenetleyicisi ve CNY70 sensörü kullanarak tasarlamışlardır. Bhati ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada unutkanlık yaşayan ve yaşlı hastalar için ilaç saatini hatırlatan, içeceği ilacın bulunduğu bölmenin ledini aktif ederek gösteren bir sistemi Arduino tabanlı olarak gerçekleştirmişlerdir. Parihar ve ark. (2017) gerçek zamanlı olarak hastanın sağlık durumunu gösteren kalp atışı ve sıcaklık bilgisini uzaktan izlenme imkânı veren Arduino tabanlı bir sistem tasarlamışlardır. Basyal ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada sistemlerine bağlı ekipmanların kontrolü için sesli komutları Android tabanlı cep telefonundaki yazılım ile metne dönüştürmüş ve sisteme bluetooth modülü üzerinden göndermişlerdir. Sathvik ve ark. (2018) hasta ve yaşlı insanların kalp atış hızının ve vücut sıcaklığının gerçek zamanlı takibini yapan ve anormal bir durumda GSM modülü vasıtasıyla ilgililere mesaj atan bir sistem üzerine çalışmışlardır.

Bu çalışmada çok fonksiyonlu akıllı masa saati geliştirilmiştir. Geliştirilen saat ile kullanıcı saat bilgisinin yanında tarih, ortamın sıcaklık, nem, aydınlık düzeyi, hava kalitesi, gaz sızıntısı gibi bilgileri de kolayca elde edebilmektedir. Ortamla ilgili parametrelerin sınır değerlerin dışına çıkması durumunda sesli ve TFT ekranda yazılı ikaz verilmektedir. Kullanıcı hem geliştirilen saat üzerindeki dokunmatik ekran ile hem de Android tabanlı cep telefonu/tablet üzerinden sesli olarak saati kontrol edebilmektedir. Hasta/yaşlı kişiler için ilaç, nabız ve ateş takip sistemi de mevcuttur. Röle modülü ile saatin bulunduğu ortamdaki 4 adet lamba/ısıtıcı/fan gibi cihaz ve ekipmanların kontrolü yapılabilmektedir. Kapsamlı radyo ve MP3 çalar ara yüzleri mevcuttur. Hesap makinası alt menüsü ile hesaplamalar kolayca yapılabilmektedir. Fotoğraf görüntüleyici sayesinde SD karttaki fotoğraflar TFT ekranda görüntülenebilmektedir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

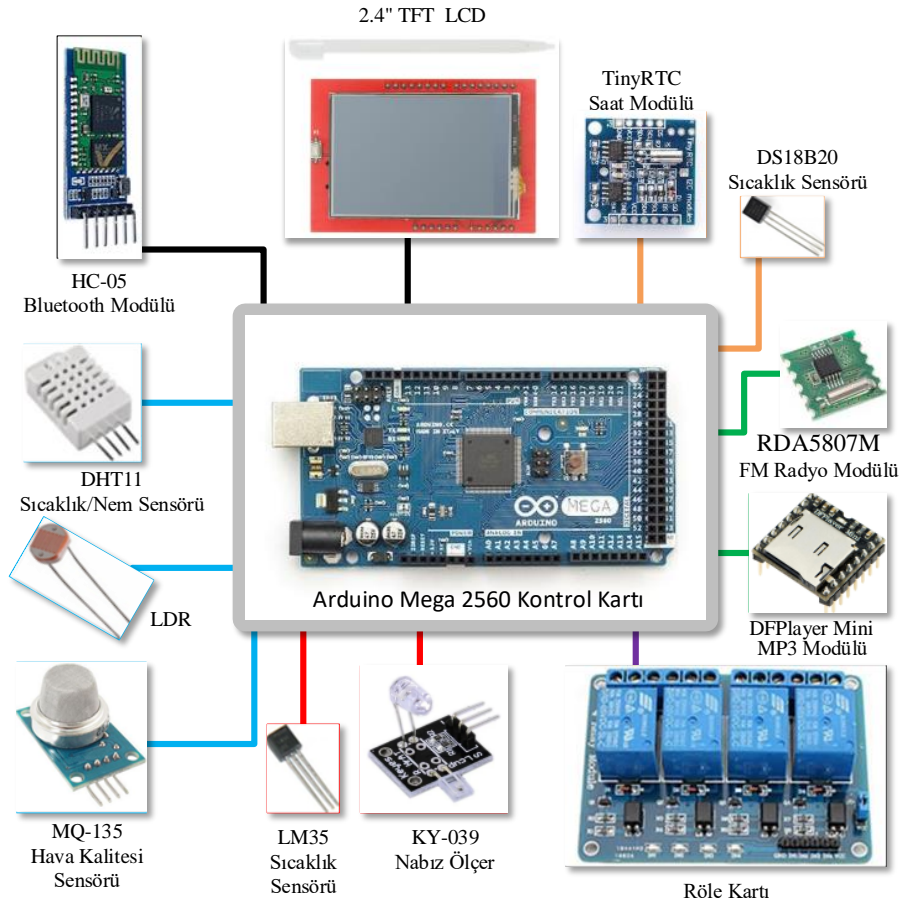
Akıllı masa saatinde kullanılan ekipmanlar ve görevleri Şekil 1'deki şemada ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Kontrol kartı Arduino Mega'nın yazılımında ve programlanmasında Arduino IDE programı kullanılmıştır. Bu sayede kullanıcının kodlar üzerinde kolayca değişiklik yapabileceği ve yeni donanımlar/menüler ekleyebileceği uyarlanabilir çok fonksiyonlu akıllı masa saati tasarlanmıştır.

### 2.1 Materyaller

Sistemin kontrolü Atmega2560 tabanlı mikro denetleyici bulunan Arduino Mega 2560 R3 kartı ile gerçekleştirilmiştir. Kartta 15'i PWM ve 16'sı analog giriş özelliğine sahip olan toplamda 54 dijital giriş/çıkış pini bulunmaktadır. Mikro denetleyicinin flash belleği 256KB, SRAM'i 8 KB ve EEPROM 4 KB hafızaya sahiptir (Anonim 2023). Yapılacak uygulama için yeterli düzeydedir.

Akıllı masa saati için 2.4" diyagonal 320x240 piksele sahip TFT LCD rezistif dokunmatik ekran kullanılmıştır (Anonim 2023a). Ekran renk çözünürlüğü 18 bit olup 8 bit dijital arayüze sahiptir. Ekran altındaki mikro SD kart yuvasına takılı olan kart sistemle ilgili durumları kaydetmek ve fotoğrafları saklamak için kullanılmıştır.

Saat ve tarih bilgilerinin hassas bir şekilde ayarlanması ve enerji kesilmesi durumunda yeniden ayarlamaya gerek duyulmaması için Tiny RTC modülü kullanılmıştır. RTC modülü, I2C haberleşme özelliğine sahip olup DS1307 clock çipi tabanlıdır (Anonim 2023b). DS18B20, One-Wire haberleşme protokolünü kullanan, yüksek hassasiyetli dijital sıcaklık sensörüdür. -55 °C ile +125 °C aralığındaki sıcaklıkları  $\pm 0.5$  °C hata payıyla ölçebilmektedir (Anonim 2023c). Besleme girişi ile veri ölçüm girişi arasına 4.7 k $\Omega$  değerinde direnç bağlanarak kullanılmıştır.



Şekil 1. Akıllı masa saati blok şeması

Ortamın sıcaklık ve nem bilgisinin tespiti için DHT22 dijital çıkışlı sıcaklık sensörü kullanılmıştır. 8 bit mikroişlemci tabanlı olup hızlı tepki vermektedir.  $-40$  ile  $+80$  °C aralığında  $\pm 1$  °C hata ile sıcaklık ölçen birim, 0-100% RH aralığında  $\pm 5$  % hata ile nem ölçümü yapabilmektedir. Sensörün örnekleme zamanı 2 sn.'dir (Anonim 2023d).

MP3 çalar modülü olarak UART seri iletişim protokolünü kullanan DFPlayer mini modülü tercih edilmiştir. Modülün dahili hafızası olmayıp üzerinde mikro SD kart yuvası bulunmaktadır. Micro SD kart FAT16 veya FAT32 olarak formatlanmalı ve içerisindeki dosyalar MP3, WAV ve WMA formatında olmalıdır. Modüldeki USB çıkışlarına bağlanan soket ile USB bellekteki müzik dosyalarını da çaldırılabilir (Anonymous 2023).

Radyo modülü olarak yüksek duyarlılıklı, düşük güç tüketimli, I2C seri haberleşme özelliği olan FM stereo radyo alıcı modülü RDA5807M kullanılmıştır. 87.5-108.5 MHz band aralığında yayınları almaktadır.

Ortamın aydınlık seviyesi tespiti için LDR kullanılmıştır. MQ-135 hava kalitesi sensörü ortamdaki NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, alkol buharı, benzen, duman ve CO<sub>2</sub> gazlarının miktarını ölçer. Havadaki gaz konsantrasyonuyla orantılı analog gerilim çıkışı vermektedir (Anonim 2023e).

Nabız ölçüm için KY-039, parmak nabız modülü kullanılmıştır. Sensör üzerinde kızılötesi led ve alıcı bulunmaktadır. Sinyal pininden gelen veriler kontrol kartı tarafından işlenerek, nabız ölçümü gerçekleştirilmektedir (Anonim, 2023f). Ateş ölçümü için ise LM35 analog çıkışlı sıcaklık sensörü tercih edilmiştir. Çıkış gerilimindeki her 10mV'luk değişim 1 °C sıcaklık değişimine karşılık gelmektedir.  $-55$  °C ile  $+150$  °C aralığında sıcaklık ölçümü yapmaktadır (Anonim 2023g).

4 kanal röle kartı 5V ile kontakların kontrol edilebildiği, mikro denetleyiciler ile kullanılabilir. 30V DC veya 220V AC gerilimde 10A'e kadar akım çekebilen cihazları kontrolünü gerçekleştirir. Her bir rölenin çalışma durumu kart üzerindeki ledler ile gözlemlenir.

HC-05 Bluetooth modülü kablosuz seri haberleşme uygulamaları için tasarlanmıştır. Diğer bluetooth modüllerinden farklı olarak master modunu da desteklemektedir. Modül Bluetooth 2.0'ı desteklemekte, 2.4GHz haberleşme frekansı ile açık alanda yaklaşık 10 m haberleşme mesafesine sahiptir (Anonim 2023h). Bluetooth modülü ile sistem kablosuz olarak Android tabanlı cep telefonu/tablet üzerinden kontrol edilebilmektedir.

## 2.2 Metot

Çok fonksiyonlu akıllı masa saati yapımında kullanılacak olan her bir donanımın ayarları öncelikle Arduino IDE programı ile gerçekleştirilmiştir. Modüllerden gerekli verilerin alınması ve ayarlanması için TFT ekranda ara yüzler oluşturulmuştur. Tüm yazılımlar birleştirilerek ana yazılım programı elde edilmiştir. Ekranı silme komutu olmadığından ara yüz oluşturulurken piksele uygun rengin atanmasına dikkat edilmelidir. TFT ekrana çizilen şekillerde karışıklığı engellemek için kolaylık açısından AutoCAD programı ile ara yüzün iskeleti çıkartılmıştır. Gerekli koordinat bilgileri alınarak temel çizim komutları yardımıyla ara yüz oluşturulmuş ve renk ataması yapılarak menüler elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2. Analog/dijital saat (a) ve ayar (b) arayüzleri

Ana kontrol kartına enerji verildiğinde ekranda ilk olarak Şekil 2' deki saat/tarih/sıcaklık bilgileri bulunan saat ara yüzü görülmektedir. Saat ayar ekranına beyaz daire simgesi tıklanarak geçilmekte ve istenen alan seçilip yukarı/aşağı ok simgeleriyle yapılan ayarlamalar AYARLA butonu ile güncellenmektedir (Şekil 2 (b)). Enerji kesintisi durumunda RTC modül pil üzerinden beslenerek çalışmasını sürdürdüğünden saatin ayarlanması gerekmemektedir. Alarm fonksiyonu benzer şekilde ayarlanarak kırmızı kare ile aktif hale getirilir ve kare yeşil renge dönüşür. Alarmın sesli uyarısı ekrana dokunulup iptal edilene kadar giderek şiddetini arttırmaktadır. Şekil 2 (b)'deki ekrandan saat ekranına dönüş beyaz daire ile ve ana menüye geçiş ev simgesi ile yapılmaktadır. Ana menüdeki alt menülere geçiş TFT ekrandaki dokunmatik düğmelerle sağlanmaktadır (Şekil 3). Farklı yaş gruplarından kullanıcıların tercih edebileceği menüler eklenmiştir. Kullanıcı isteğe bağlı olarak kendi menülerini de kolayca oluşturabilecektir.

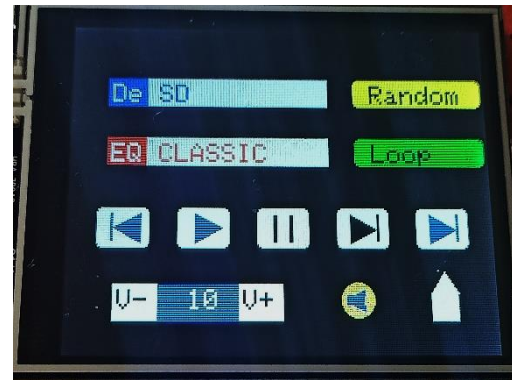


Şekil 3. Ana menü ekranı

RDA5807M radyo modülünün tüm özelliklerinin kolay kullanımını sağlayan bir ara yüz Şekil 4 (a)'da ki gibi tasarlanmıştır. Sesin stereo/mono seçimi, sesi kapatma, bass kontrolü, mevcut frekansı ekranda gösterme, otomatik bir sonraki/önceki kanalı bulma, frekansı artırma/azaltma, ses artırma/azaltma ve istenilen 5 radyo kanalına ait frekans bilgilerini hafızada tutma, enerji kesintisi durumunda son dinlenen radyo frekansını hafızada tutarak tekrar aynı frekansta açılma gibi özelliklere sahiptir. Kanal kaydetmek için yeşil daire ile kayıt kısmına geçilmektedir. Kanal seçimi <s ve s> ile gerçekleştirmekte ve istenen m. kısmına 5 sn. basıldığında yeşil daire kırmızı renge dönüşecek ve radyo kanalı seçilen m. hafızaya kaydedilecektir. Radyo kanalının RDS özelliği mevcutsa bilgileri frekans ekranın üzerine yazdırılmaktadır (Şekil 4 (a)).



(a)

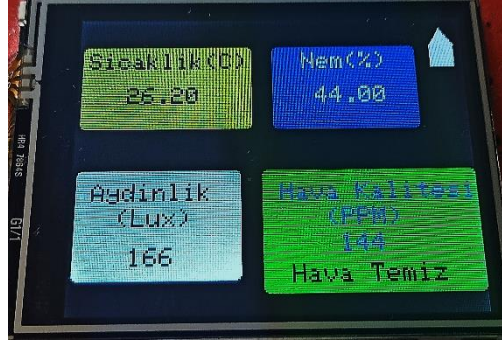


(b)

Şekil 4. FM radyo (a) ve MP3 çalar (b) ara yüzleri

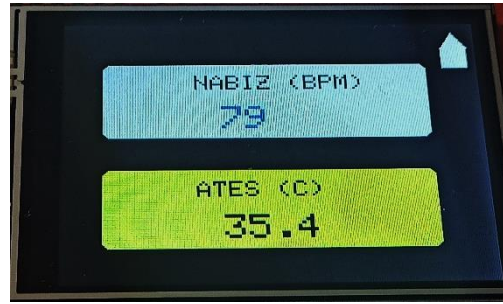
DFPlayer mini MP3 modülü için tasarlanan ara yüz bir MP3 çaların tüm özelliklerini barındırmaktadır. Şekil 4 (b)'deki ara yüz ile şarkıların depolandığı yerin (SD kart veya harici USB bellek) seçimi, 6 farklı ekolayzır seçeneği, rastgele parça çalma veya aynı parçayı/ klasörü sürekli çalma seçenekleri mevcuttur. Parça çalmayı başlatma sonraki /önceki parçayı seçme çalan parçayı durdurup daha sonra kaldığı yerden devam etme, ses seviyesi ayarı, sesi kapatma imkânı kullanıcıya sunulmaktadır.

Ortam bilgisi için Şekil 5'teki ara yüz oluşturulmuştur. Ölçülen havanın nem miktarı %, sıcaklığı °C ve ortamın aydınlık seviyesi lüks biriminde ekranda gösterilmektedir. Ayrıca ortamın hava kalitesi ile ilgili durum bilgisi detaylı olarak ekrana yazdırılmaktadır.



Şekil 5. Ortam ara yüzü

Sağlık alt menüsünde nabız ve ateş ölçümü için Şekil 6'daki ara yüz hazırlanmıştır. Ölçülen nabız/ateş bilgisi sınır değerlerin dışına çıkarsa ilgili kısmın rengi kırmızıya dönerken sesli ikaz verilmektedir. Anormal durumlar TFT ekrandaki mikro SD kart içerisine tarih/saat/ölçüm değeri ile kaydedilmektedir. Değerler normale döndüğünde sesli ve görsel uyarı kalkmaktadır.



Şekil 6. Sağlık ara yüzü

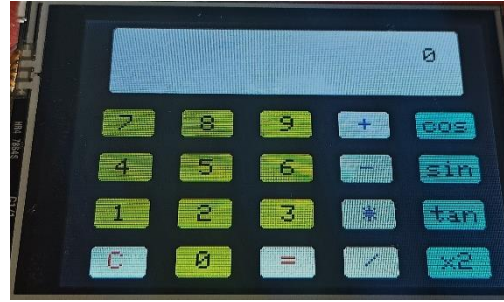
Sağlık alanında bir tedavi yönteminin başarısız olmasının en yaygın nedeni, hastanın ilacını/ilaçlarını doğru doz ve zamanda almamasıdır (Solanki ve Zope, 2018). Günümüzde doğru doz ve zamanda ilaç kullanımı için hatırlatıcı akıllı ilaç kutuları geliştirilmiştir. Çok fonksiyonlu akıllı masa saatinde ilaç takip ara yüzü de bulunmaktadır. İlaç takip sistemi ara yüzü Şekil 7'de verilmiştir. Ara yüzdeki beyaz daire ile saat ara yüzüne, beyaz ev simgesi ile ana menüye geçiş yapılmaktadır. Gün içerisinde 12 farklı ilaç alımı alarmı ayarlanabilmektedir. İlaç zamanı ayarlaması için saat/alarm sırası/ilaç türü/alarm tipi kısımlarından birine dokunarak seçme işlemi yapıp +/- tuşları ile ayarlar yapılır. Gerekli tüm ayarlar yapıldıktan sonra Onay Ekle tuşuyla ilgili alarm sırasına atama işlemi gerçekleştirilir. Alarm olarak bazer sesli ikaz seçilebileceği gibi mp3 modülüne kaydedilmiş ses dosyasından alınacak ilaç ve kullanım bilgisi de kullanılabilir. Alarm sıralarının yanındaki kutu seçildiğinde eğer renk mavi olursa aktif eğer renk kırmızı ise pasif olma durumunu göstermektedir. Günlük değil gün aşırı veya farklı günlerde kullanılacak ilaçlar için ikinci bir ekran ilave edilerek tarihe bağlı ayarlama yapılabilir.



Şekil 7. İlaç takip ara yüzü

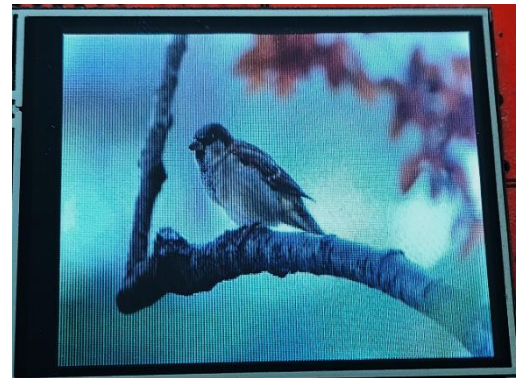
İlaç alarm zamanı geldiğinde akıllı saatte ekrana Şekil 7'deki gibi 2 sn. aralıklarla uyarı yazısı gelmekte ve sesli ikaz yapılmaktadır. Kullanıcı tarafından ekrana dokunularak alarm iptal edilmezse 5 dk. aralıklar ile 1 saate kadar tekrarlanmakta ve SD karta alınmayan ilacın tarih/saat/ilaç türü kaydedilmektedir. İlaç alım zamanları ve bilgileri EEPROM hafızada tutulduğundan sistemin beslemesi kesilse dahi veriler silinmemektedir.

Ana menüye her türlü kullanıcının temel hesaplarını gerçekleştirebilecek düzeyde bir hesap makinası da eklenmiştir. Hesap makinası ekranına dokunularak ana menüye geçiş yapılır (Şekil 8).



Şekil 8. Hesap makinası ara yüzü

Ana menüden fotoğraf alt menüsü tıklandığında SD kat içerisine .bmp uzantılı kaydedilen 320x240 boyutundaki fotoğraflar 10sn aralıklarla ekrana gelmektedir. Şekil 9'daki gibi ekranda fotoğraf gösterilirken ekranın herhangi bir noktasına dokunulduğunda fotoğraf alt menüsünden ana menüye geçiş yapılmaktadır.



Şekil 9. TFT ekranda fotoğraf gösterimi



Çok fonksiyonlu akıllı masa saatini Android tabanlı cep telefonu/tablet üzerinden bluetooth modülü ile uzaktan kontrolü için ücretsiz olan Bluetooth Electronics uygulaması kullanılmıştır (Anonymous 2023a). Bluetooth Electronics uygulamasının kütüphanesinden ilgili elemanları alıp kontrol arayüzü Şekil 10 (a)'daki gibi oluşturulmuştur. Özellikle yaşlı insanlar için tasarlanan bir ara yüz olup 5V ile çalışan 4'lü röle kartının kontrolü gerçekleştirilmektedir. Röle 1 sisteme enerji verip/kesme işlemini gerçekleştirmektedir. Odadan çıkarken tüm ekipmanlardaki enerjinin kesildiğinden emin olmak için böyle bir işlem düşünülmüştür. Röle 1 aktif değilse diğer rölelere enerji uygulanamayacağından cihazlar devre dışı kalacaktır. Röle 2 odanın lambasını kontrol ederken, Röle 3 odadaki ısıtıcıyı ve Röle 4'te havalandırma (fan) sistemini kontrol etmektedir. Oluşturulan ara yüzde her bir röle için bir anahtar ve bir gösterge amaçlı renkli lamba tercih edilmiştir. Enerji anahtarı açıldıktan sonra üzerindeki lamba yanar ve sisteme enerji verilir bundan sonra diğer ekipmanların anahtarı açılırsa ekipmanlar çalışmaya başlar, Çalışır durumda olan ekipmana ait led röle kartında görsel olarak bilgi vermektedir (Şekil 10(b)).



(a)



(b)

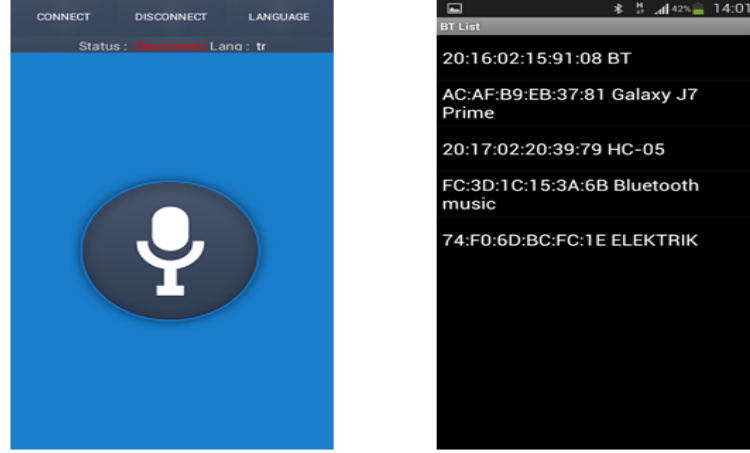
Şekil 10. Cihaz kontrolü için oluşturulan ara yüz (a) ve röle kontrol kartı (b)

Çok fonksiyonlu akıllı masa saati üzerindeki TFT ekrandan kontrol içinde aşağıdaki ara yüz oluşturulmuştur. İlgili ekipman/cihaz devre dışı ise üzerindeki lamba siyah, devreye alındığında ise kırmızı yanmaktadır (Şekil 11). Ekipman/cihazın devrede olup/olmaması durumu EEPROM hafızasında saklandığından Android cihaz veya saat üzerinden gerçek zamanlı olarak güncel çıkış bilgilerine ulaşılmaktadır.



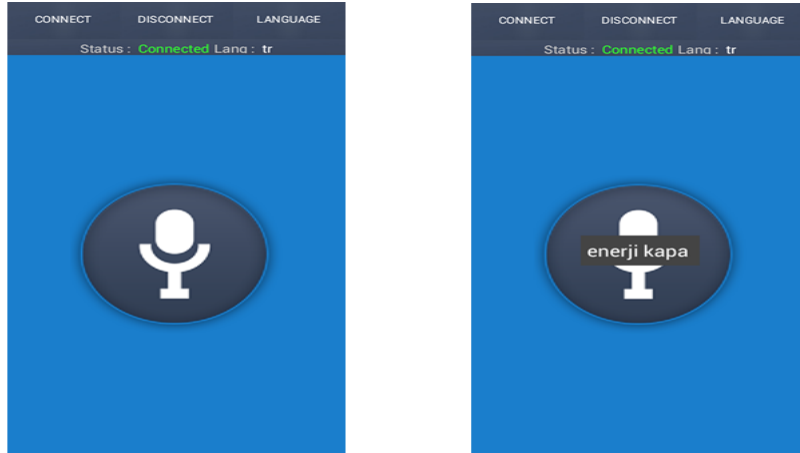
Şekil 11. Cihaz kontrol ara yüzü

Röle kartının ve tüm sistemin kontrolü ses komutlarıyla da gerçekleştirilebilmektedir. Bunun için Arduino Voice Control uygulamasının cihazda kurulu olması yeterlidir. Connect butonuna basıldığında açılan bluetooth bağlantı ekranı (Şekil 12) bluetooth modülü HC-05 seçilmektedir.



Şekil 12. Arduino Voice Control program bağlantı ekranı

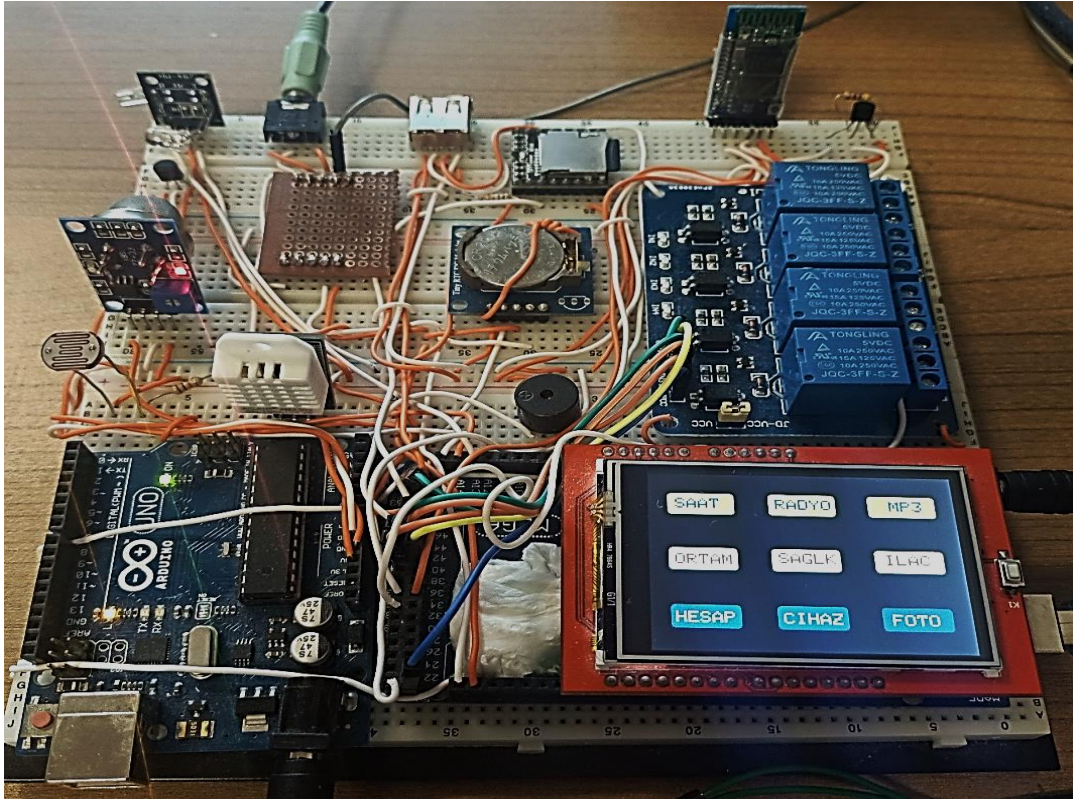
Bluetooth bağlantısı durum kısmından gözlemlenebilmektedir. İnternet bağlantısı mevcutken sözlü komut iletimi mikrofon butonuna basılarak sağlanmaktadır. Algılanan komutlar hem ekrana yazılmakta (Şekil 13) hem de iletilmektedir. Uygulama aracılığıyla sesli komutlar yazıya dönüştürülerek bluetooth modülü üzerinden seri haberleşme ile kontrol kartına aktarılmaktadır. Röle çıkışlarının kontrolü için geçerli sesli komutlar “enerji aç”, “enerji kapa”, “lamba aç”, “lamba kapa”, “ısıtıcı aç”, “ısıtıcı kapa”, “fanı aç”, “fanı kapa” olarak tanımlanmıştır.



Şekil 13. Arduino Voice Control konuşma ve algılama

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çok fonksiyonlu akıllı masa saatinde kullanılan tüm ekipmanların bir araya getirilmesiyle oluşturulan prototip Şekil 14’te verilmiştir. Görüldüğü gibi sistem kolayca bir ürüne dönüştürülebilecektir. Prototipte gözükten Arduino Uno kartının sadece 5V ve 3.3V çıkışları donanımların beslenmesinde kullanılmıştır. Geliştirilen akıllı masa saatinin fonksiyonları/özellikleri detaylı olarak Çizelge 1’de verilmiştir.



Şekil 14. Çok fonksiyonlu akıllı masa saati prototipi

Çizelge 1. Akıllı masa saatinin fonksiyonları ve özellikleri

Saat Fonksiyonları	Özellikleri
Saat	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Analog ve dijital saat gösterimi</li> <li>➤ Ay/Gün/Yıl olarak tarih gösterimi</li> <li>➤ Ortam sıcaklık bilgisi gösterimi</li> <li>➤ Alarm</li> </ul>
Radyo	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Stereo/Mono ses seçimi</li> <li>➤ Sessiz mod</li> <li>➤ Bass kontrolü</li> <li>➤ Kanalları hafızaya alma</li> <li>➤ Otomatik kanal arama</li> <li>➤ Manuel kanal arama</li> <li>➤ RDS modu</li> </ul>
MP3	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ SD kart/USB'den şarkı çalma</li> <li>➤ Rastgele parça çalma</li> <li>➤ Ekolayzır</li> <li>➤ Parça/dosya döngüye alma</li> </ul>
Ortam	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ortamın sıcaklık bilgisi</li> <li>➤ Ortamın nem bilgisi</li> <li>➤ Ortamın Aydınlık düzeyi</li> <li>➤ Ortamın hava kalitesi</li> <li>➤ Anormal durum gözlemlendiğinde sesli ikaz</li> </ul>
Sağlık	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Nabız ölçümü</li> <li>➤ Vücut sıcaklık ölçümü</li> <li>➤ Anormal durumda sesli ikaz</li> <li>➤ Ölçüm değerlerini saklama</li> </ul>
İlaç Takip	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ İlaç türü/alım zamanı ayarı</li> <li>➤ İkaz tipi seçimi</li> <li>➤ Sesli ve görsel ikaz</li> <li>➤ İlaç kullanım bilgilerini saklama</li> </ul>
Hesap Makinası	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Dört işlem</li> <li>➤ Kare alma</li> <li>➤ Cos/Sin/Tan hesaplama</li> </ul>
Cihaz kontrol	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ TFT ekrandan kontrol</li> <li>➤ Android cihaz ile sesli kontrol</li> <li>➤ 4 adet röle çıkışı üzerinden cihaz kontrolü</li> <li>➤ Android cihaz ile arayüzden kontrol</li> </ul>
Fotoğraf	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 320x240 ya da 240x320 boyutunda fotoğraf gösterimi</li> <li>➤ SD karttaki fotoğrafları 10sn aralıklarla oynatma</li> </ul>

Akıllı saatler ile ilgili olarak literatürde yapılan çalışmalar incelenmiş olup kullanılan mikroişlemci ve özellikleri bakımından karşılaştırması Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Literatür çalışmalarının karşılaştırılması

Kaynaklar	Mikroişlemci	Özellikleri
Khan ve ark. (2012)	16F877A	Yedi parçalı göstergede zaman, tarih ve sıcaklık gösterimi
Sundaresan ve ark. (2014)	Atmega8A	Zaman, tarih, sıcaklık ve ışık şiddetini LCD'de gösterme, gece lambası, yangın algılama ve bazer sesi ile ikaz, uzaktan kontrol
Drabek ve ark. (2016)	ATmega2560 (Arduino Mega)	Zaman, hareket, sıcaklık, nem ve aydınlık seviyesi bilgilerini kullanarak uyku kalitesini belirleme
Kumar ve ark. (2018)	Atmega328P (Arduino Uno)	Gün doğumu benzetimi, kahve aroması, tonu değişen müzik ile alarm, hava tahmini, hatırlatıcı
Thakur ve ark. (2020)	LX6 (ESP32)	Zaman gösterimi, hareket algılama ve wi-fi modül üzerinden internet erişimi ile evin güvenliğini sağlama
Wen ve Zheng (2021)	AT89S52	Zaman, tarih ve sıcaklık bilgilerinin LCD'de gösterimi
Hama Rawf ve Abdulrahman (2022)	Atmega328P (Arduino Uno)	Buton/sesli komut ile zamanı sorgulama sonucunda sesli olarak zaman bilgisini kullanıcıya iletme ve ekranda zaman/tarih bilgisini gösterme
Kwansomkid ve ark. (2023)	Xtensa LX106 (ESP8266)	Etkili uyku sağlığını ayarlama, Bylink tabanlı olarak sensör verilerinin gösterimi/sistemin kontrolünü akıllı telefon uygulaması üzerinden gerçekleştirme
Bu çalışmada	ATmega2560 (Arduino Mega)	Zaman, tarih, sıcaklık bilgilerini TFT dokunmatik ekranda gösterme, alarm, radyo ve MP3 çalar, bulunduğu ortamın sıcaklık, nem, aydınlık düzeyi ve hava kalitesini ölçme, bireyin vücut sıcaklığı ve nabız ölçümünü yaparak gözetim altında tutma, ilaç kullanımı hususunda bireyi alınacak ilaç ve zamanı hakkında ikaz ederek takibini yapma, ortamda bulunan cihazların kontrolünü yapma, SD karta kayıtlı fotoğrafları belirli aralıklarla gösterme, temel işlevleri gerçekleştirecek hesap makinası fonksiyonu

Günümüzde dijital saatler mekanik saatlere göre yüksek doğruluk ve dayanıklılığa sahip olduğundan daha çok tercih edilmektedir. Tasarlanan saat değerlendirilmesi açısından ergen, genç, orta yaş, yaşlı olmak üzere her bir yaş grubundan 3 bireye kullanılmıştır. Kullanım kolaylığı, içerdiği özellikler ve performans açısından olumlu geri bildirimler alınmıştır. Kullanıcılar tarafından internet üzerinden de tablet/telefon ile ortamdaki cihazların kontrol edilebilmesi, kamera modülü ilave edilerek ortamın güvenliğinin takip edilebilmesi, saatin kullanımın sadece dokunmatik ekran ile değil de harici butonlar üzerinden de yapılabilmesi, menü simgelerinin büyütülerek menü sayfa sayısının artırılması, saatin alarm olarak sesli alarmın yanında kullanıcı tarafından seçilen radyo kanalı veya mp3 modülü üzerinden istenen parçanın kullanılabilmesi gibi farklı talepler gelmiştir. Güneş pili ve şarj edilebilir batarya eklenerek saatin ihtiyaç duyduğu enerji için harici kaynak kullanımı ortadan kaldırılabilir. Modüler yapısı eklenecek ekipman ve yazılımında yapılacak ufak değişiklikler ile hepsinin kolayca yapımını mümkün kılacaktır.

#### 4. SONUÇ

Günümüzde saatler sadece zamanı göstermenin yanında birçok özelliği de beraberinde kullanıcıya sunmaktadır. Tasarlanan akıllı masa saati zaman, tarih, ortam sıcaklık-nem, aydınlık seviyesi ve hava kalitesi bilgisini bir arada sağladığı gibi, bir radyo ve MP3 çalarda olması gereken özellikleri de barındırmaktadır. Dokunmatik ekran ile her yaş grubu için kullanım kolaylığı sunmaktadır. Bulduğu ortamın hava kalitesi, sıcaklık-nem bilgisi sürekli olarak izlenmekte ve belirlenen eşik değerlerin aşılması durumunda sesli alarm ile ikaz vermekte ve ekranda da yazılı olarak belirtmektedir. Anormal duruma ait bilgileri tarih ve saat bilgisiyle birlikte ORTAM dosyasında kayıt altına almaktadır. Böylece ortamdaki ilaç ve gıda gibi maddeler koruma altına alınmaktadır. Ortamda sigara içilmesi veya gaz kaçağı durumlarını hemen tespit ederek sesli ikaz verilmektedir. Böylece olası bir yangın veya zehirlenme durumunun önüne geçilebilir.

Takip edilen bir hastanın nabız ve ateş bilgisi ölçülerek anormal durum gözlemlenmesi halinde SAGLIK dosyasında tarih/zaman bilgisiyle birlikte kayıt altına alınarak, sesli ikaz verirken alt menüdeki ilgili kısmın fonu kırmızı renge dönüşecektir. İlaç kullanan bir kişi için kullanım çizelgesi ile doğru doz ve zaman ayarlaması sağlanabilecektir. Kullanılmayan doz için alarm verilerek ILAC dosyasına kaydı sağlanmaktadır.

Birçok fonksiyona sahip radyo ve MP3 ara yüzü klasik radyo ve MP3 çaları aratmamaktadır. MP3 modülü sayesinde çocuklara masal/hikâye/öykü dinletilebilecektir. Yazılımdaki değişiklikler ile saat alarmı olarak radyo/mp3 kullanılabilir.

Görme engelli ve bozukluğu olan kişiler için Android işletim sistemine sahip bir cep telefonu/tablet üzerinden de akıllı masa saati sesli kontrol edilebilmektedir

Akıllı masa saati mikro denetleyiciler ile ilgili dersler için eğitim materyali olarak da kullanılabilir. SPI, I2C, RS232 vb. haberleşme özelliğine sahip sensörler kullanıldığından bu protokoller hakkında uygulamalı eğitim çalışmaları da gerçekleştirilir. Akıllı masa saati modüler olduğundan yeni ekipmanlar kolayca eklenebilir. Akıllı masa saatinin mevcut prototipi geliştirilerek ürün haline kolayca dönüştürülebilir özelliktedir.

Gelecek çalışmalarda kontrol kartı olarak hem daha hızlı hem de dahili wi-fi ve bluetooth modülü bulunan ESP32 kartı kullanılabilir. İnternet olan herhangi bir yerden Android tabanlı telefon/tablet ile akıllı masa saatine kolayca erişilip gerekli ayarlamalar yapılabilir ve bilgiler elde edilebilir. PWM ve ADC çözünürlükleri daha yüksek olduğundan cihazlar/ekipmanlar daha hassas olarak kontrol edilebilir. Kamera eklenerek ortamın güvenliği de sağlanabilir. Çok çıkışlı röle modülü ile çok sayıda ekipman kontrol edilebilir.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından “18.KARİYER.239” kodlu proje ile desteklenmiştir.

## 6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## 7. YAZAR KATKISI

Mehmet Yumurtacı, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi/yönetimi, veri toplama, veri analizi, yorumlama, makale taslağının oluşturulması ve fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi konularında tam sorumluluğa sahiptir.

## 8. KAYNAKLAR

Ahasan A.A., Roy S., Saim A.H.M., Akter R., Hossain Z., Arduino-Based Real Time Air Quality and Pollution Monitoring System. International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology (IJRCST) 6(4), 81-86, 2018.

Anonim 2023. Arduino Mega (2560), <https://www.direnc.net/arduino-mega-2560-r3-usb-kablo-dahil> (Erişim Tarihi: 10.02.2023).

- Anonim 2023a. TFT Ekran, <https://www.projehocam.com/urun/2-4-inch-dokunmatik-tft-ekran/> (Erişim Tarihi: 10.02.2023).
- Anonim 2023b. Tiny RTC, <https://www.domirobot.com/tiny-rtc-i2c-modulu-24c32-hafiza-ve-ds1307-gercek-zaman-saat-chip-pmu4760>, (Erişim Tarihi: 12.02.2023).
- Anonim 2023c. DS18B20, <https://www.direnc.net/ds18b20-sicaklik-sensor-entegresi-to-92>, (Erişim Tarihi: 12.02.2023).
- Anonim 2023d. DHT22 Sıcaklık ve Nem Sensörü, [https://www.robotistan.com/dht22-sicaklik-ve-nem-sensoru-am2302?gclid=EAIaIQobChMIq7fU\\_N664wIVyuJ3Ch0pZw9eEAAYASAE%20gJiU\\_D\\_BwE](https://www.robotistan.com/dht22-sicaklik-ve-nem-sensoru-am2302?gclid=EAIaIQobChMIq7fU_N664wIVyuJ3Ch0pZw9eEAAYASAE%20gJiU_D_BwE) (Erişim Tarihi: 13.02.2023).
- Anonim 2023e. MQ-135 Hava Kalitesi Ölçüm Sensörü, <https://www.roboshop.com.tr/mq-135-hava-kalitesi-olcum-sensoru-mq135?search=mq135&description=true>, (Erişim Tarihi: 14.02.2023).
- Anonim 2023f. KY-039 Parmak Nabız Ölçer, <https://www.robimek.com/ky-039-parmak-nabiz-olcer-sensor-kullanimi>, (Erişim Tarihi: 15.02.2023).
- Anonim 2023g. LM35 Sıcaklık Sensörü, <http://devreokulu.com/LM35.html>, (Erişim Tarihi: 15.02.2023).
- Anonim 2023h. HC05 Bluetooth Modülü, <https://www.robotistan.com/hc05-bluetooth-serial-modul-karti-hc05-bluetooth-to-serial-port-module-br>, (Erişim Tarihi: 16.02.2023).
- Anonymous 2023. DFPlayer mini, [https://wiki.dfrobot.com/DFPlayer\\_Mini\\_SKU\\_DFR0299](https://wiki.dfrobot.com/DFPlayer_Mini_SKU_DFR0299), (Erişim Tarihi: 17.02.2023).
- Anonymous 2023a. Bluetooth Electronics, <https://www.keuwl.com/apps/bluetoothelectronics/>, (Erişim Tarihi: 18.02.2023).
- Basyal L., Kaushal S., Singh G., Voice Recognition Robot with Real Time Surveillance and Automation. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)* 6(1), 11-16, 2018.
- Bhati S., Soni H., Zala V., Vyas P., Sharma Y., Smart Medicine Reminder Box, *IJSTE - International Journal of Science Technology & Engineering*, 3(10), 172-177, 2017.
- Drabek A., Krejcar O., Selamat A., Kuca K., A Smart Arduino Alarm Clock Using Hypnagogia Detection During Night. *Springer International Publishing Switzerland*, pp. 514–526, 2016.
- Hama Rawf, K.M., Abdulrahman, A.O., Microcontroller-Based Kurdish Understandable and Readable Digital Smart Clock. *Science Journal of University of Zakho* 10(1), 1–4, 2022.
- Husain A.M., Rini T.H., Haque M.I., Alam R., Air Quality Monitoring: The Use of Arduino and Android. *Journal of Modern Science and Technology* 4(1), 86-96, 2016.
- Khan S.R., Kabir A., Hossain D.A., Designing Smart Multipurpose Digital Clock Using Real Time Clock (RTC) and PIC Microcontroller. *International Journal of Computer Applications* 41(9), 39-42, 2012.
- Kumar S., Dhiraj D., Cibi C., Sowmya S., Sabitha S., Smart Alarm Clock, *Proceedings of the International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES 2018)*, Coimbatore, India, October 15-16, 2018, pp. 999-1001.
- Kwansomkid, K., Ketcham, M., Ganokratanaa, T., Pramkeaw, P., Chumuang, N. Smart Alarm Clock for Effective Sleep Health, 2023 IEEE International Conference on Cybernetics and Innovations (ICCI), phetchaburi, Thailand, May 30-31, pp. 1-5, 2023.
- Mandula K., Parupalli R., Murty C.H.A.S., Magesh E., Lunagariya R., Mobile based Home Automation Using Internet of Things (IoT), 2015 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT), Kumaracoil, India, Dec. 18-19, 2015, pp. 340-343.

- Öter E., Demir A.A., Coşkun Ö., Mikrodenetleyici Temelli Parmak Ucundan Nabız Ölçer Devresi Tasarımı. *Journal of Engineering Sciences and Design* 4(2), 87-92, 2016.
- Parihar V.R., Tonge A.Y., Ganorkar P.D., Heartbeat and Temperature Monitoring System for Remote Patients using Arduino. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, 4(5), 55-58, 2017.
- Saon S., Boon T.C., Mahamad A.K., Self Power Temperature and Humidity Data Logger, 8th MUCET 2014, Melaka, Malaysia, November 10-11, 2014.
- Sathvik G.S.K., Yashwanthkumar P.V.S., Satish S., Arduino Based Health Monitoring System Using GSM. *International Journal of Electronics, Electrical and Computational System* 7(4), 165-167, 2018.
- Solanki N., Zope P.H., Smart Pill Box Health Care System. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 05(07), 2018.
- Sundaresan Y.B., Jaiswal A.K., Kumaresan P., A Smart Multi-Purpose Remote Controlled Digital Clock. *International Journal of Applied Engineering Research* 9(15), 3163-3172, 2014.
- Thakur H., Master M., Bharti S., Smart Wall Clock with an Electric Eye. *Procedia Computer Science* 170, 1071-1076, 2020.
- Wen H., Zheng Q., Design of a High Precision Digital Clock Based on Single Chip Microcomputer, The 2021 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2021), January 21-24, pp. 693-697, 2021.

---

Araştırma Makalesi / Research Article

---

**Evaluation of Hot Corrosion Behavior of WC-Co-Cr Coatings Coated by the HVOF Method**

Yasin ÖZGÜRLÜK\*

Bartın University, Vocational School of Health Services, Department of Medical Services and Techniques, Optician Program, Bartın, Turkey.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1121-5018>, yozgurluk@bartin.edu.tr, ozgurlukyasin@gmail.com

Geliş/ Received: 25.04.2023;

Kabul / Accepted: 15.05.2023

**ABSTRACT:** Thermal spray coating techniques have wide-ranging applications in various fields, including marine, automotive, biomedical, and aerospace industries. These methods are popularly used because materials coated with thermal spray coatings exhibit excellent resistance to oxidation, erosion, corrosion, and abrasive environments, particularly at high temperatures. The present study utilized the high-speed oxy-fuel (HVOF) technique, a state-of-the-art thermal spray coating method, to apply a hard cermet ceramic coating material consisting of WC-Co-Cr onto a 316L stainless steel substrate. Isothermal hot corrosion tests were also conducted at 750°C in the presence of 45% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and 55% V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> hot corrosion salts for 1, 3, and 5 hours. Advanced characterization techniques such as X-Ray Diffractometry (XRD), Energy Dispersive Spectrum (EDS), scanning electron microscopy (SEM), and elemental mapping analysis devices were used to characterize the samples coated with the HVOF technique before and after hot corrosion tests. The findings indicate that WC-Co-Cr hard coatings, which are known for their high resistance to abrasion, sustain severe damage at high temperatures. The coating was damaged after 5 hours in the hot corrosion tests performed in the presence of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> molten salt at 750°C. In addition, due to the progressing corrosion process in the coating layer, spills and deterioration occurred. Due to the shedding of the coating layer, damage has occurred in the substrate material.

**Keywords:** WC-Co-Cr Hard Cermet Ceramic Material, Hot Corrosion, High-Velocity Oxy-Fuel (HVOF), Thermal Spray Coatings.

---

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: yozgurluk@bartin.edu.tr, ozgurlukyasin@gmail.com

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Özgürlük, Y. (2023). Evaluation of Hot Corrosion Behavior of WC-Co-Cr Coatings Coated by the HVOF Method. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 286-301.



## HVOF Yöntemiyle Kaplanan WC-Co-Cr Kaplamaların Sıcak Korozyon Davranışının Değerlendirilmesi

**ÖZET:** Termal püskürtme kaplama teknikleri, denizcilik, otomotiv, biyomedikal ve özellikle havacılık endüstrisi gibi çeşitli alanlarda geniş kapsamlı uygulamalara sahiptir. Bu yöntemler, termal püskürtme kaplamalarla kaplanmış malzemelerin, özellikle yüksek sıcaklıklarda oksidasyona, erozyona, korozyona ve aşındırıcı ortamlara karşı mükemmel direnç göstermesi nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, modern bir termal püskürtme kaplama yöntemi olan yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) tekniği kullanılarak, WC-Co-Cr içeren sert sermet seramik kaplama malzemesi, 316L paslanmaz çelik bir alt tabaka üzerine kaplanmıştır. Ayrıca, 1, 3 ve 5 saat boyunca 750°C'de %45 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve %55 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sıcak korozyon tuzları varlığında izotermal sıcak korozyon testleri yapılmıştır. HVOF tekniği kullanılarak kaplanmış örnekler, X-ışını Difraktometrisi (XRD), Enerji Dispersiyon Spektrometresi (EDS), taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve elementel haritalama analiz cihazları gibi gelişmiş karakterizasyon teknikleri kullanılarak sıcak korozyon testleri öncesi ve sonrasında karakterize edilmiştir. Bulgular, yüksek aşınma direnci ile bilinen WC-Co-Cr sert kaplamaların yüksek sıcaklıklarda ciddi hasar gördüğünü göstermektedir. Kaplama, 750°C'de V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ve Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> erimiş tuz varlığında yapılan 5 saatlik sıcak korozyon testlerinden sonra hasar görmüştür. Ayrıca kaplama tabakasında ilerleyen korozyon sürecine bağlı olarak dökülmeler ve bozulmalar meydana gelmiştir. Kaplama tabakasının dökülmesinden dolayı da altlık malzemede hasarlar oluşmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** WC-Co-Cr Sert Sermet Seramik Malzeme, Sıcak Korozyon, Yüksek Hızlı Oksijen Yakıt (HVOF), Termal Sprey Kaplamalar.

### 1. INTRODUCTION

Hot corrosion, oxidation, and wear are the most common damage mechanisms that surface engineers encounter. It is of great importance that the materials produced and used in our daily lives are more durable in terms of less material and energy loss (Singh et al., 2022; Testa et al., 2022). It is necessary to protect these materials to have less loss of materials used in many application areas such as automotive, ship, aircraft, and medical. The longevity of the materials used in these sectors will reduce the production of new materials (Singh et al., 2022; Hu et al., 2021). Reducing material production will result in less energy and ore usage. Thus, it will contribute to the world economy and ecosystem. One of the works of surface engineers to reduce material losses and extend their life is to coat materials (Lashmi et al., 2019; Carpio et al., 2019). The coating process is the general name of the processes carried out to physically and chemically change the surface of a material. By coating the surface of a material, a more durable and economical material design is provided against aggressive environments that the substrate materials alone cannot resist (Ahmadi et al., 2019). Coating methods of materials, especially metals, are generally hot-dip, electroplating, mechanical coating, diffusion, and thermal spray coating methods. Thermal spray coating techniques are used to coat metals, particularly those utilized in high-temperature applications (Wiesner et al., 2020).

Substrate materials in thermal spray coating methods are high-temperature resistant materials such as cast irons, super alloy materials, and steels (Patil and Vagge, 2022). The basic goal of this technology is to melt a coating material that is stronger than the substrate material at high temperatures and send it as molten or semi-molten material to the surface of the substrate. Flame spray, arc spray, detonation gun, high-velocity oxy-fuel, cold gas dynamic spray, atmospheric plasma spray, vacuum plasma spray, and electron beams physical vapor deposition are a few thermal spray

coating techniques. Among these methods, EB-PVD and APS methods are used to deposit coating materials with very high melting temperatures, such as ceramic materials, on the substrate surface (Ozgurluk et al., 2018). The HVOF method, on the other hand, is preferred for depositing metal coating materials with high melting temperatures on the substrate surface. According to other methods, since the melted coating material in this technique is sent to the substrate surface at supersonic speeds, the material to be coated has little contact with atmospheric conditions. Therefore, oxide and porosity in the coating microstructure are at a minimum level (Liu et al., 2022).

The HVOF coating method, which has been used since the beginning of the 20th century, is one of the most important thermal spray coating techniques even today. Acetylene, propylene, and propane gases, as well as mixtures of these gases, are mostly preferred as flammable gases in the system. The procedure is started by sending an oxygen-rich gas mixture into the coating system. The coating process takes place under approximately 65-85 psi pressure (Wang et al., 2022; Testa et al., 2022). The thickness of the produced coatings varies between 0.1-1 mm. Combustion gas mixtures melt the coating material and send it to the substrate surface at supersonic speeds. The optimum distance of the coating torch from the substrate varies between 200-400mm. Coatings obtained after production have high adhesion strength, low porosity, and high density. The high temperatures used in the coating process ensure that the molten or semi-molten particles have significant thermal energy. The coating particles are delivered to the substrate surface at a rate of 500 to 800 m/s (Kalush et al., 2022; Doleker et al., 2018). The negative effects brought on by high temperatures are lessened by the fact that the temperature is lower than the plasma spray coating process. Additionally, due to the high speeds at which the materials to be coated are delivered to the substrate surface, even if the coating material is not melted, it can still cling to the substrate material because of the kinetic energy it possesses (Yang et al., 2022; Karaoglanli et al., 2017; Doleker et al., 2020). The excellent bond strength of the materials coated using the HVOF process is guaranteed by this adhesion property. Additionally, compared to the plasma spray coating technology, high-speed coatings and lower temperatures offer exceptional impact resistance in the coating layers. Additionally, many coatings created with this technique exhibit excellent slip, friction, and wear resistance. The drawback of this method is that ceramics with high melting temperatures cannot be used as coating materials, and the noise level is extremely high during production (Kiatisereekul et al., 2021; Doleker et al., 2021; Ozgurluk, 2022).

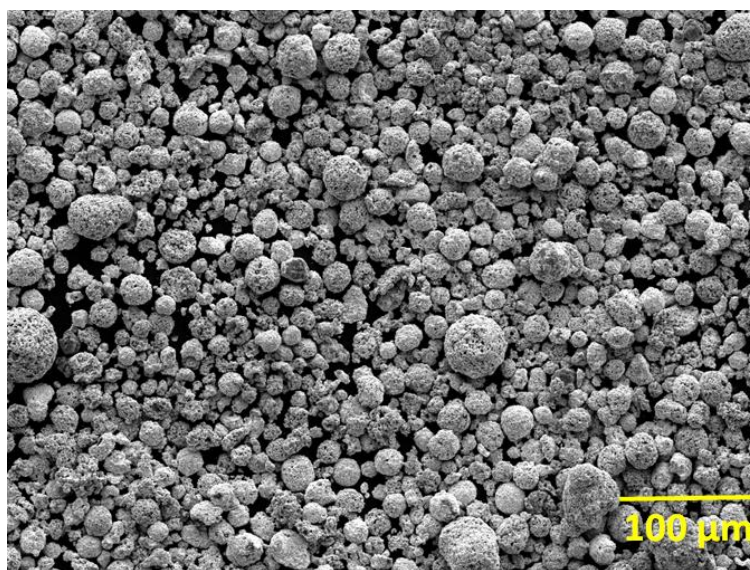
The HVOF technique, a cutting-edge thermal spray coating technique, demonstrates benefits like adaptability, continuity of the curing stage, and cheap cost when it comes to the deposition of WC-based materials. The HVOF-produced WC-Co-Cr coating materials have exceptional resistance to slip, wear, erosion, and friction. In particular, the high performance of WC-Co-Cr coatings at room temperature is supported by the studies available in the literature (Ma et al., 2014; Bolelli et al., 2014; Wood, 2014; Song et al., 2020). Tested the wear behavior of WC-Co-Cr and WC-CrxCy-Ni coatings produced by Song et al. In the study, it was observed that the Ni element added to the coating had a strength-enhancing effect at high temperatures. In addition, WC-Co-Cr coatings are the preferred material to prevent water droplet erosion in steam turbines. For this reason, WC-based coating with the HVOF technique is preferred as a promising approach in many areas (Vuoristo, 2007). The materials, which are typically coated using the WC-containing HVOF process, exhibit good high-temperature resistance and strength (Campo et al., 2009). The coatings coated with this approach exhibit very good behavior against wear and oxidation due to their low porosity and oxide content. Additionally, they are quite good at attaching the coating material to the substrate surface and resisting high temperatures (Ghadami., 2015; Niihara 1983).

In contrast to previous research, this study looked into the hot corrosion behavior of WC-Co-Cr coatings deposited on 316L stainless steel substrates using the HVOF process at high temperatures. Results of mapping analysis, SEM, XRD, and EDS performed after 750 °C hot corrosion tests were compared and analyzed.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Materials

For the production of the coatings, firstly, 316L stainless steel substrate materials with the dimensions of 25x25x10mm<sup>3</sup> were procured. To prepare the substrate materials for the coating procedure, to clean the surfaces from dirt and oxide layers, and roughen them, they were sandblasted with the help of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder particles under approximately 2 bar pressure. Then, WC/Co/Cr coating powders with a purity of 99% at a mixing ratio of 86/10/4 by weight were obtained from the GTV company in the range of 5-25 µm. SEM image showing the spherical morphology of commercially obtained WC/Co/Cr powders is given in Figure 1. The substrate materials, which were sandblasted and made ready for the coating process, were placed in the Hipojet 2700-M (Mec, Jodhpur, India) branded HVOF coating unit and commercially obtained WC-Co-Cr powders were added to the powder feed unit. The spherical morphology of the powders provided a lot of convenience for the coating process. The parameters and carrier gases used in the HVOF coating process are given in Table 1.



**Figure 1.** SEM image of WC-Co-Cr coating powders

**Table 1.** Parameters used in the HVOF thermal spray coating method

Materials	Combustible gases used in the method	Carrier gases used in the method	Material feed rate	Coating distance
WC-Co-Cr cermet powders	O <sub>2</sub> (230-240 slpm) CH <sub>4</sub> (85-90 slpm)	N <sub>2</sub> (5.5-6 slpm)	12.5-13 g/min.	250-260 mm

Coatings produced by the HVOF method are more environmentally friendly and perform better than coatings coated with the electrolysis method. In addition, the choice of coating material in this

method includes a wide range. Cermet coatings produced by the HVOF method, such as WC-Co-Cr, are replacing many coating methods (Pulsford et al., 2019). Due to the nature of the HVOF method, coating large and complex-shaped parts was not possible. Thanks to the new generation of spray torches developed, the surfaces of narrower areas began to be effectively coated from shorter distances (Lyphout and Björklund 2014). Thus, the contact of molten particles with the atmosphere in coating processes carried out from shorter distances is also minimized (Zhao et al., 2019). During the coating processes, which sequentially take place from a shorter distance, the heated coating particles reach the substrate material without losing their heat. With this effect, complete melting may not occur in the particles reaching the substrate. As a result, low plastic deformation and poor bonding occur. Considering all the positive and negative effects of the new generation HVOF method, materials produced using optimum coating parameters exhibit superior properties compared to materials produced by other methods. In this study, the coating parameters specified in Table 1 are the optimum values for WC-Co-Cr coating material.

The surface roughness, hardness, and porosity of the WC-Co-Cr hard cermet material deposited on the 316L stainless steel substrate using the HVOF technique, a new thermal spray coating method, were measured prior to high-temperature testing. The results of the measurements, conducted using a Mitutoyo SJ-310 (Japan) device for surface roughness, a Qness Q10 (Austria) device for hardness, and the Image-J porosity measurement program for porosity, are presented in Table 2. All values shown in Table 2 are values obtained before the hot corrosion of coating samples. After the sanding and polishing stages of the samples, which were mounted for hardness, the hardness value was measured from 5 different regions in the microhardness device. For porosity, cross-sectional SEM images were taken from the samples taken from the bakelite. Average porosity values from 5 different cross-sections SEM images are added to the table. For the roughness value, the average of the values taken from 5 different regions from the top surface of the pre-corrosion coating sample was determined.

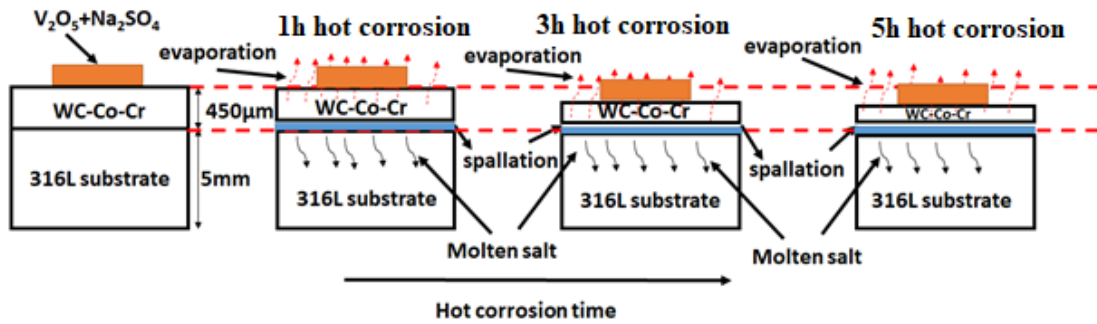
**Table 2.** The roughness, porosity, and hardness values of WC-Co-Cr hard cermet coating materials, which were coated using the HVOF technique, one of the thermal spray coating methods

	<b>Hardness (Hv)</b>	<b>Porosity (%)</b>	<b>Roughness (Ra <math>\mu\text{m}</math>)</b>
WC-Co-Cr material	1565-1570	0.49 $\pm$ 0.17	3.17-3.20

## 2.2 Hot Corrosion tests

Hot corrosion is a type of damage that occurs at high temperatures due to the presence of impurities in fuels used in various industrial sectors, such as NaCl, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, and KCl. These impurities melt at high temperatures and diffuse into the coating materials, causing damage. There are two types of hot corrosion damage: Type-I at high temperatures of 850-1000°C and Type-II at lower temperatures of 600-850°C. This study investigated Type-II hot corrosion damage of WC-Co-Cr coating material by sprinkling 55% V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and 45% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> salt mixtures on the coating materials, which were then subjected to isothermal hot corrosion tests for 1, 3, and 5 hours at 750°C. The samples were analyzed using advanced techniques such as SEM, XRD, EDS, and mapping before and after the tests to investigate their behavior against hot corrosion. Approximately 20mg/cm<sup>2</sup> of hot corrosion salts were sprinkled on each sample, and they were placed in an electric furnace operating at 750°C under open atmospheric conditions.

The diagram showing the time-dependent damage effect of hot corrosion damage mechanisms is given in Figure 2.



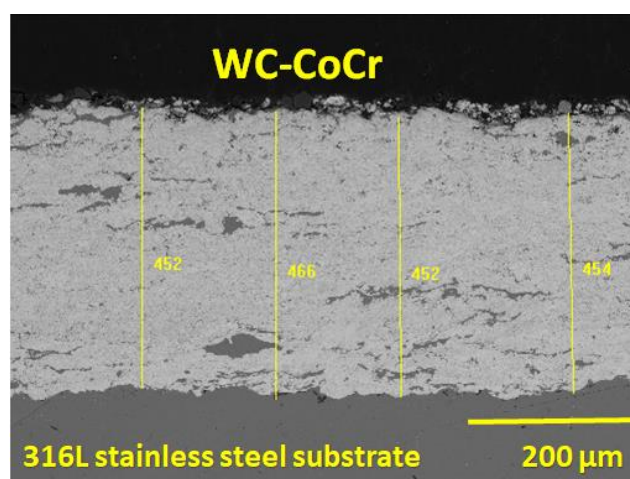
**Figure 2.** Time-dependent damage effect of hot corrosion damage mechanisms

After the hot corrosion tests, each sample was first taken from the oven that cooled down to room temperature for microscopic analysis. All samples taken from the furnace were individually embedded in cold bakelite. The samples taken for mounting were sanded for approximately 3 minutes on 60, 80, 100, 120, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200, and 2000 mesh-size sandpapers, respectively. All the sanded samples were then polished with the diamond solution in  $3\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m}$ , and  $0.25\mu\text{m}$  cloths and made ready for microscopic analysis.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 Characterization of as-sprayed WC-Co-Cr advanced ceramic cermet coatings

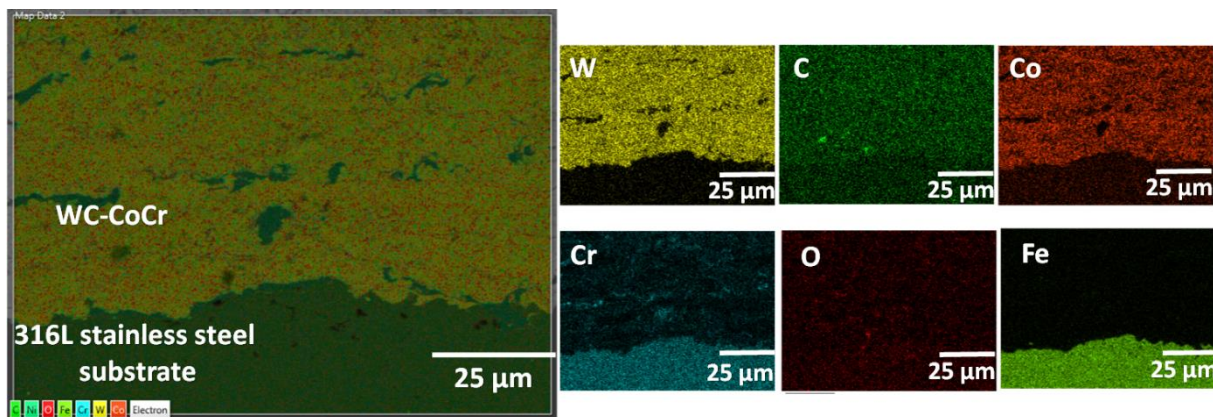
The HVOF coating method, which is widely used in many sectors such as aviation, space, ship, and automotive, provides an oxide-free, porosity-free, and dense coating layer. In Figure 3, a cross-section SEM image of 316L stainless steel material coated with WC-Co-Cr advanced ceramic cermet material by the HVOF method is given. It is seen that the coating layer completely exhibits the characteristic features of the HVOF method. As a result of the measurements made from 4 regions of the produced coating thickness, it is seen that it is approximately  $450\mu\text{m}$ . The coating layer with WC-Co-Cr content provides the 316L stainless steel substrate material with hardness and strength, as well as oxidation and corrosion resistance.



**Figure 3.** As-sprayed cross-section SEM image of 316L stainless steel material coated with WC-Co-Cr

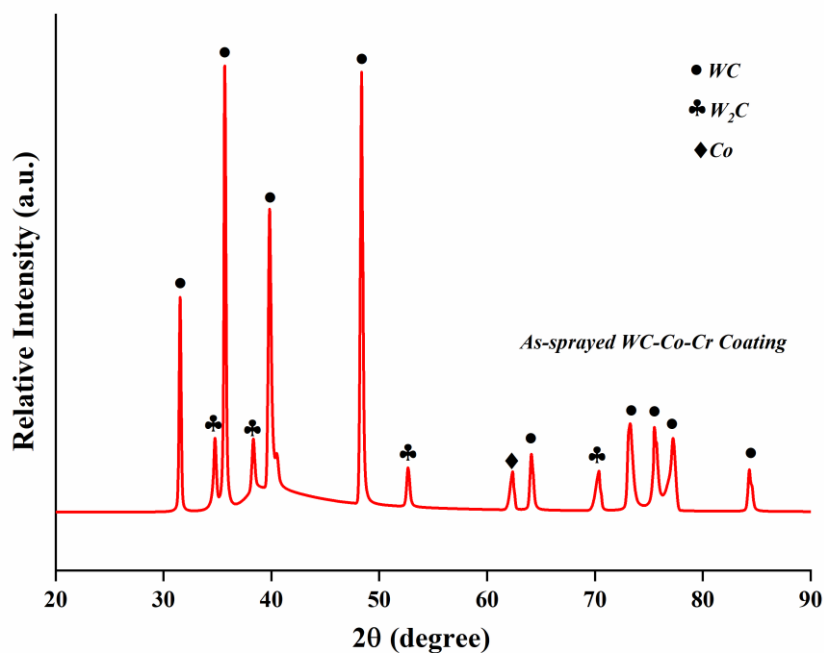
Figure 4 presents the elemental mapping analysis results of the WC-Co-Cr coating system deposited by the HVOF technique. The coating content mainly consists of W, C, Co, and Cr elements, while the 316L stainless steel substrate contains Fe, C, Cr, and Co elements. The coating layer exhibits

an oxide-free, non-porous, and compact microstructure, which is a characteristic feature of the HVOF technique. These results are consistent with our previous studies that also utilized the HVOF method (Doleker et al., 2018; Doleker et al., 2021).



**Figure 4.** As-sprayed cross-section mapping analysis of WC-Co-Cr coated 316L stainless steel material

The XRD phase analysis results from the top surface of the WC-Co-Cr cermet coating layer are presented in Figure 5, which reveals the presence of WC, W<sub>2</sub>C, and Co phase structures in the coating system manufactured using the HVOF method.



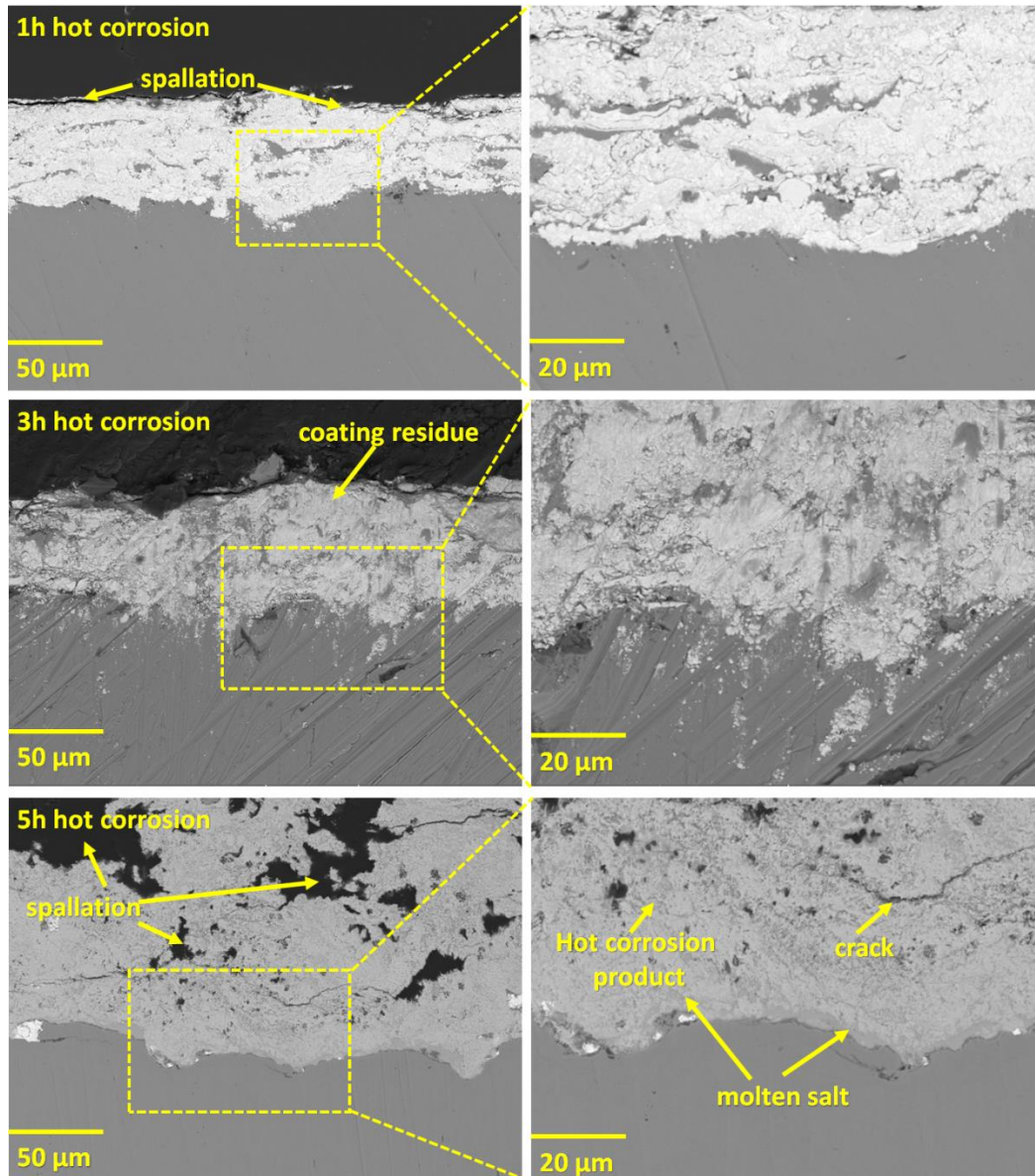
**Figure 5.** XRD analysis of the as-sprayed WC-Co-Cr coating system

### 3.2 Hot corrosion effect on WC-Co-Cr advanced ceramic cermet coatings

As it is known, if the hot corrosion damage mechanism occurs between 850-1000°C, it is called high-temperature hot corrosion (type1), if it occurs between 650-850°C, it is called low-temperature hot corrosion (type2). Since WC-Co-Cr coating system tests are carried out at 750°C in the presence of 55% V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and 45% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> corrosion salts, it is in type 2 corrosion type. In this damage mechanism, corrosion salts melt with the effect of temperature and interact with the coating system. The reactions present in the damage mechanism begin as follows:



In the hot corrosion event,  $\text{V}_2\text{O}_5$  and  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  corrosion salts begin to melt under the influence of temperature, leak into the coating through micro-cracks and pores and move toward the lower layers. Hot corrosion damage mechanism occurs with various reactions. The corrosion salts that melt at high temperatures react with each other to form the  $\text{NaVO}_3$  phase first (Peng et al., 2012; Habibi et al., 2013; Saremi et al., 2013).

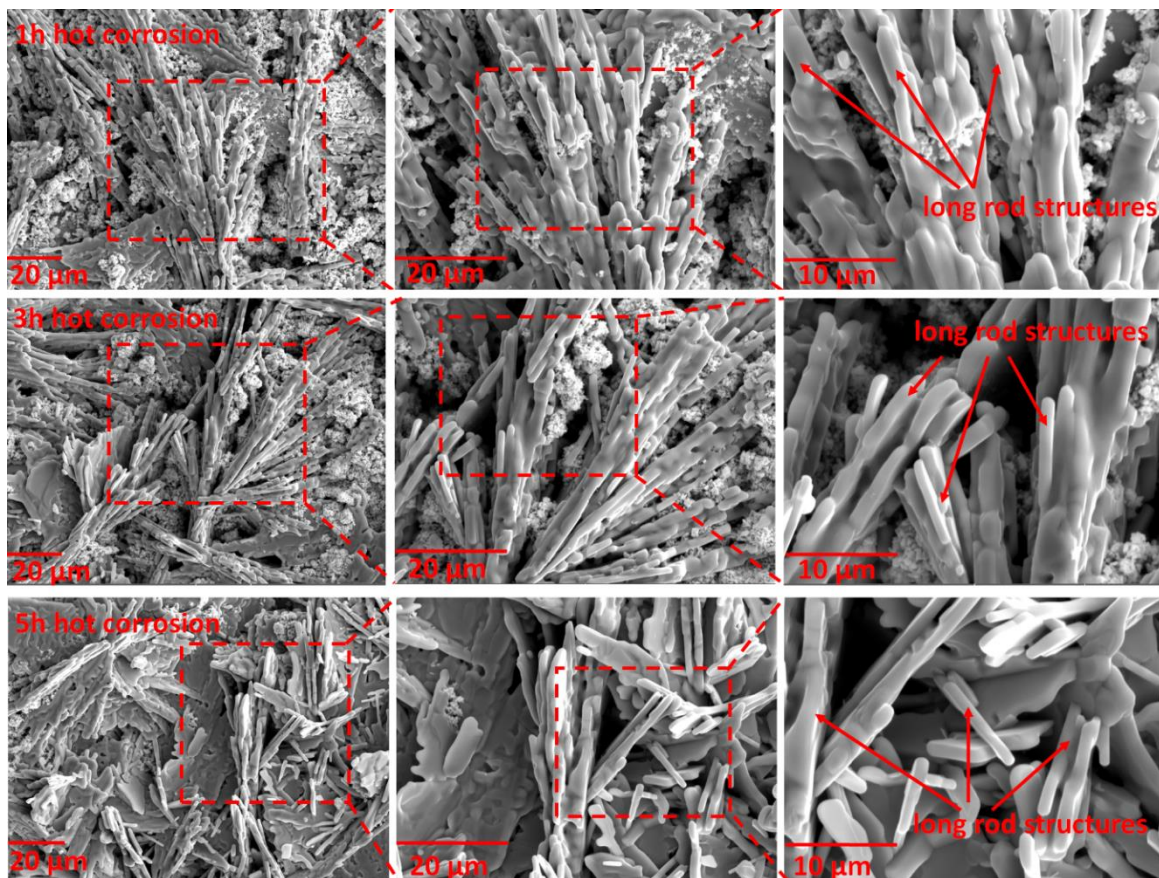


**Figure 6.** Cross-section SEM images of WC-Co-Cr coating system after hot corrosion test

In Figure 6, cross-section SEM images obtained after isothermal hot corrosion tests of the WC-Co-Cr coating system are given. In this study, in which the low-temperature hot corrosion damage mechanism was realized, molten corrosion salts formed reactions with the coating layer and caused the layer to be damaged. Parts of the coating layer interacting with corrosion salts were separated from the structure and a significant decrease in coating thickness was observed. After the first 1-hour

hot corrosion test, the porosity structure with the top parts of the substrate material was observed. After the corrosion test of 3 and 5 hours, the existing porosities in the structure were closed with the effect of sintering. The coating thickness continued to decrease as the hot corrosion process progressed. After the corrosion test was conducted for 3 and 5 hours, the existing porosities in the structure were closed with the effect of sintering. This indicates that the high temperature and pressure conditions of the hot corrosion process caused the coating material to fuse together, filling in any pores or voids that were previously present. This effect is known as sintering. The coating thickness continued to decrease as the hot corrosion process progressed. This suggests that the hot corrosion process was causing the coating material to wear away or dissolve, potentially exposing the underlying substrate material to further damage (Chen et al., 2018; Habibi et al., 2013). Overall, these results suggest that the hot corrosion process can have significant effects on the structure and properties of coated substrate materials, and further research may be needed to better understand and mitigate these effects (Kim et al., 2017).

In Figure 7, there are SEM images of the surface obtained after the hot corrosion tests of the WC-Co-Cr coating system at different magnifications. On the top surface, there are long bar structures formed by coating layers interacting with corrosion salts. It is thought that the V element causes these long rod structures. Similar long rod-like structures were seen in previous hot corrosion studies (Ozgurluk et al., 2018). In this study, long rod-like structures were formed as a result of the reaction of melting corrosion salts with the coating layer.



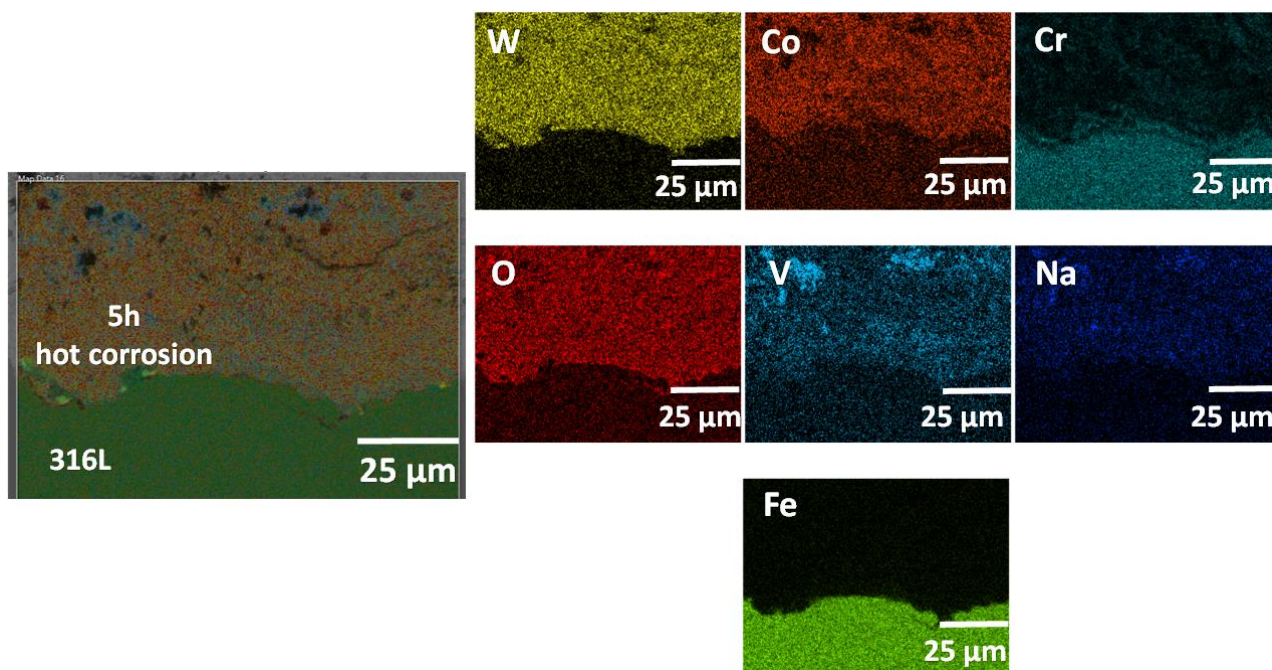
**Figure 7.** SEM images of the top surface of the WC-Co-Cr coating system after the hot corrosion test

The coating layer reacted with the molten salts and started to separate into layers after 1 hour of hot corrosion and after 5 hours of corrosion test, it almost completely detached from the substrate



material. The cross-section images in Figure 6 were obtained from the coating residues on the substrate surface after the tests. Similar to this study, the tribocorrosion behavior of three WC-based coatings prepared by the HVOF method was carried out in a 3.5% NaCl solution. Unlike hot corrosion, the effect of corrosion and wear was investigated in the study, which was carried out with the help of an abrasive at room temperature. These three coatings were Co, CoCr, and Cr-7Ni matrix WC cermets. According to the experimental results, it has been observed that the binding phases greatly affect the corrosion and wear performances. Among the coatings, WC-12Co content exhibited very low corrosion resistance, while coatings with WC-10Co<sub>4</sub>Cr and WC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni contents showed higher corrosion resistance. Similar to this study, in other studies in the literature, it was observed that the added Cr element in addition to the Co element increased the corrosion resistance (Zou et al., 2015).

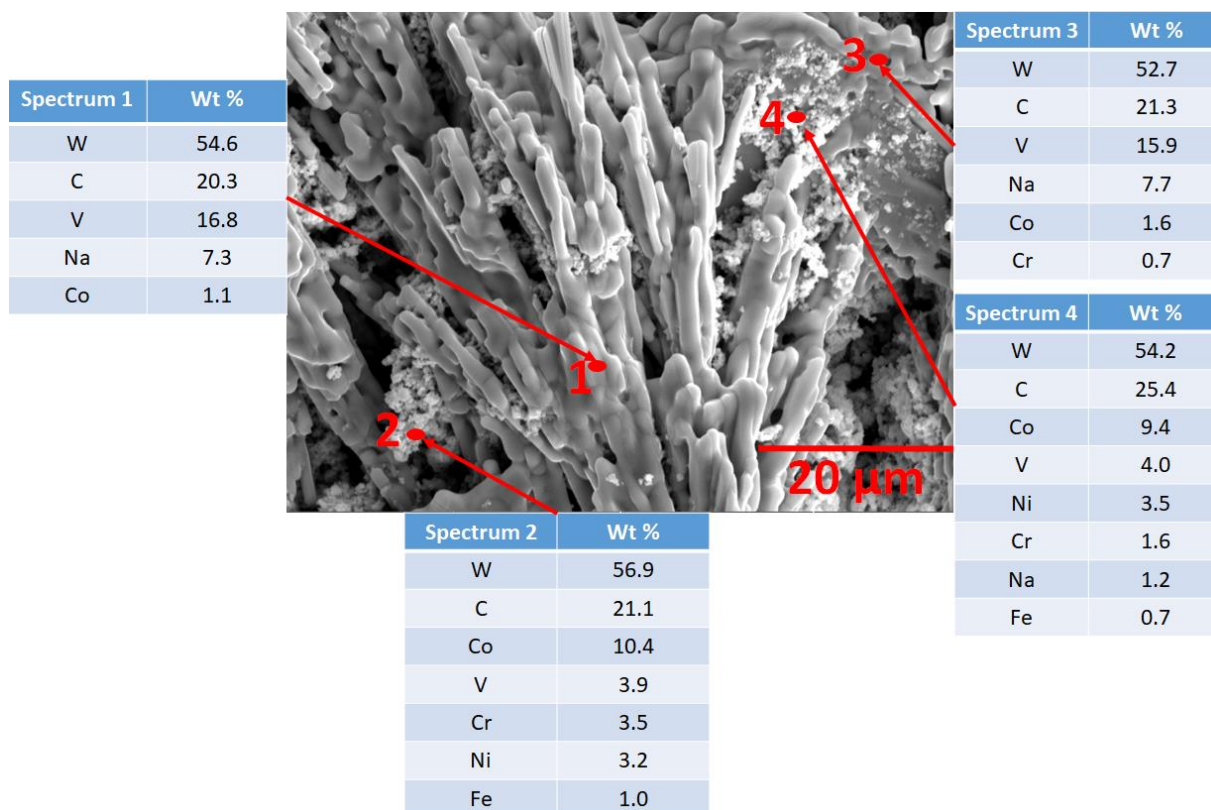
The results of the elemental mapping analysis conducted after the hot corrosion test are presented in Figure 8. The hot corrosion tests were performed in open atmospheric conditions, which resulted in the simultaneous occurrence of both oxidation and hot corrosion damage mechanisms in the coating materials. The mapping analysis clearly illustrates the infiltration of the V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> salt mixtures, which melt at high temperatures, into the inner regions of the coating layer.



**Figure 8.** Cross-section elemental mapping analysis of WC-Co-Cr coating system after hot corrosion test

Unlike in this study, Kaur et al. used the HVOF technique to coat Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr on SAE-347H boiler steel. Kaur et al., who performed cyclic hot corrosion experiments in the presence of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>) corrosion salts at approximately 700°C, stated that the oxidized structure of the rich Cr content increased the hot corrosion and oxidation resistance (Kaur et al., 2009). Similarly, corrosion resistance of materials coated with the HVOF method on mild steel substrate using NiCr powders was tested. It was observed that the corrosion resistance of the samples whose SEM and XRD analyzes were performed before and after the corrosion tests were also increased (Aalamialeagha et al., 2003). Sundararajan et al. coated the coating material containing 80Ni-20Cr and 50Ni-50Cr on a steel substrate surface using both HVOF and APS methods. In the oxidation tests performed at 650°C for 100, 1000, and 3000 hours, they stated that all coatings produced by the HVOF method were more

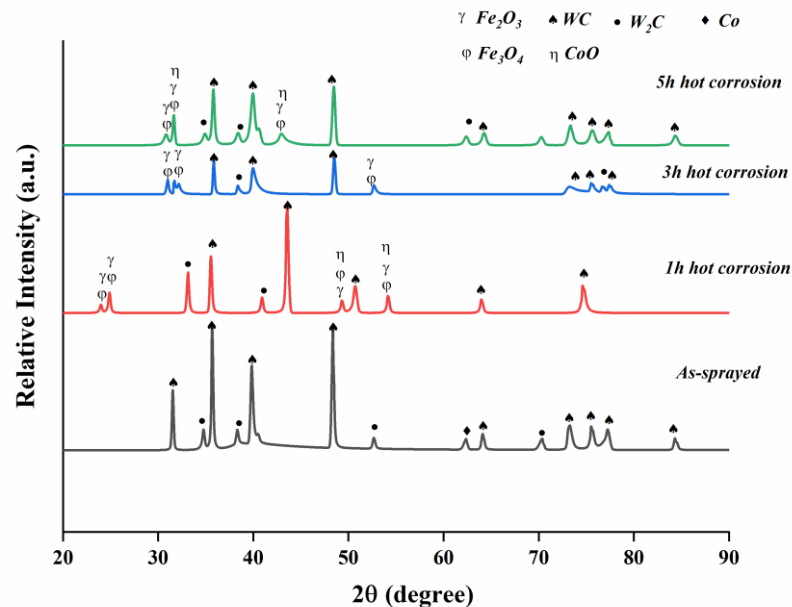
durable than the coatings produced by the APS method (Sundararajan et al., 2005). Sidhu et al. produced  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -NiCr, WC-12Co, Stalite 6, and Ni-20Cr coatings on ASTM-SA210 GrAl boiler tube steel using the HVOF method. In the cyclic hot corrosion tests carried out in the presence of 60%  $\text{V}_2\text{O}_5$  and 40%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  salts at  $900^\circ\text{C}$ , it was observed that the corrosion resistance of the coatings formed a protective oxide layer was better. In densely layered structures, an increase in corrosion resistance has been observed since oxygen and molten corrosion salts have to travel a long way along grain boundaries (Sidhu et al., 2006). In another study, the behavior of T11 and T22 boiler pipe steels against oxidation was investigated by coating with NiCrFeSiB alloy by the HVOF method. It has been observed that the superior oxidation performance of the NiCrFeSiB coating is due to the amorphous  $\text{SiO}_2$  and protective  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  layer formed on the top surface (Mahesh et al., 2009). In a work in which 347H boiler steel was coated with Ni-20Cr with the HVOF technique, the oxidation resistance of coated and uncoated steels at  $700^\circ\text{C}$  was investigated. As a result of cyclic oxidation tests, it was observed that the coated samples were highly resistant to oxide flaking (Kaushal et al., 2011). Similar results were also seen in our study.



**Figure 9.** Top surface EDS analysis after hot corrosion test of WC-Co-Cr coating system

Unlike other studies, in our hot corrosion study, EDS analyzes were performed on the top surfaces of the WC-Co-Cr coating system after the hot corrosion tests. The result of this EDS analysis obtained from the top surface is given in Figure 9. Elemental point analysis was carried out in 4 different regions. The effects of  $\text{V}_2\text{O}_5$  and  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , which are hot corrosion salts, are observed at every point where the analyzes are performed. Analysis 1 was performed from the long rod-like structures present on the top surface. As an elemental distribution, in addition to W, C, and Co elements, V and Na elements were also encountered. It has been observed that the Cr element in the coating structure is not present in the long rod-like structures. Point analysis number 2 was carried out from the sedimentary structures present on the coating surface. In addition to W, C, Co, and Cr

elements in the elemental distribution of sediment-shaped structures, V elements from corrosion salts and Ni and Fe elements present in the substrate material components were also encountered. EDS analysis results from 3 and 4 contain similar contents to the results of EDS analysis 2. According to the results of 4 different EDS analyses, it was observed that long rod-like structures were first formed in the structure in the hot corrosion damage of the WC-Co-Cr coating system. It was understood that the long rod-like structures were separated from the top surface together with the coating layer, depending on the progressive corrosion time.



**Figure 10.** Top surface EDS analysis after hot corrosion test of WC-Co-Cr coating system

We can also see the results of the XRD analyses performed, where the coating layer is damaged and separated from the structure. The XRD analyses performed after each hot corrosion test are given in Figure 10 by superimposing them. As a result of isothermally performed hot corrosion tests, it is seen that phase separation occurs in the WC layer in the WC-Co-Cr coating layer inside the structure. While the WC layer transforms into the W<sub>2</sub>C phase, it is seen that the element Co, which has a high affinity for oxygen, also turns into the CoO phase. As a result of the separations in the coating layer and the migration of the base material components towards the top part, oxidized phases of the Fe element were also encountered. The elements V and Na, which are hot corrosion salts, were not encountered in the XRD phases. The reason for this is thought to be that these corrosion salts are very low compared to other composition elements and that the long rod-like structures that perform phase transformation are separated from the coating surface. X-ray diffraction (XRD) is a powerful technique used to analyze the crystal structure and chemical composition of materials. However, the XRD analysis can only detect the elements and compounds that are present in sufficient quantities and within the detection limit of the technique. In the case of hot corrosion salts, such as V and Na, their concentrations in the coating material may be relatively low compared to other elements, which makes them difficult to detect using XRD. Moreover, the long rod-like structures that perform phase transformation during hot corrosion may be located deep within the coating material and separated from the coating surface. This can also make it difficult for XRD to detect the presence of these structures, as the technique is typically surface-sensitive and may not penetrate deeply into the material. Other analytical techniques, such as scanning electron microscopy (SEM), energy-

dispersive X-ray spectroscopy (EDX), or transmission electron microscopy (TEM), may be more suitable for detecting and characterizing the hot corrosion salts and the rod-like structures in the coating material. These techniques can provide higher resolution and depth of analysis, which can be used to locate and identify the hot corrosion products and understand their mechanisms of formation.

In addition to phase transformations such as WC, W<sub>2</sub>C, it is possible to talk about the presence of iron oxide phase structures such as Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> in the XRD analysis results. No iron-containing compounds are present in the coating layer. The reason why these phase structures are encountered in the XRD analysis is due to the shedding of the coating layer in some regions and the emergence of ferrous compounds in the base material, stainless steel. These results were also seen in the hot corrosion studies carried out before (Kiatisereekul et al., 2021; Doleker et al., 2021; Ozgurluk, 2022).

#### 4. CONCLUSION

Isothermal hot corrosion tests were conducted on the WC-Co-Cr hard cermet coating materials deposited on a substrate of 316L stainless steel using the HVOF technique, which is one of the thermal spray coating methods, at a temperature of 750 °C. The results were analyzed in accordance with the existing literature and presented below.

- WC-Co-Cr advanced hard cermet coating materials were deposited successfully on a 316L stainless steel substrate using the innovative thermal spray coating method, HVOF. The resulting coating microstructure is characterized as dense, non-porous, and oxide-free.
- Hot molten corrosion salts formed long rod-like structures on the top surface of the WC-Co-Cr coating layer. Since long rod-like structures cause volume increases in the coating layer, thermal expansion mismatches have occurred in the coating layer and some parts of the coating layer have been spilled.
- As a result of XRD analysis, it was observed that oxidized compounds of Fe element occur in a hot corrosion damage mechanism.
- It has been observed that the behavior of WC-Co-Cr hard cermet material, which is known to be resistant to abrasion, against hot corrosion is quite weak.
- In the XRD analysis results, phases such as Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> were found in addition to the phase structures in the coating. The appearance of these phases indicates that shedding has occurred in the coating layer.

#### 5. ACKNOWLEDGEMENTS

The Scientific Research Projects (BAP) Coordination of Bartın University provided financial support for this research under project numbers 2021-FEN-A-010 and 2021-FEN-A-011.

#### 6. CONFLICT OF INTEREST

The authors confirm that, to the best of their knowledge, there are no conflicts of interest or competing interests with any institution, organization, or individual that could influence the review process of the paper.

## 7. AUTHOR CONTRIBUTION

Yasin ÖZGÜRLÜK contributed to the conceptualization and management of the research, design of the research and management of the project, data analysis and interpretation of the results, critical review of the intellectual content, preparation of the manuscript, and final approval and overall responsibility for the paper.

## 8. REFERENCES

- Aalamialegha M.E., Harris S.J., Emamighomi M., Influence of the HVOF spraying process on the microstructure and corrosion behaviour of Ni-20%Cr coatings. *J. Mater. Sci.* 38(22):4587–4596, 2003.
- Ahmadi M.S., Shoja-Razavi R., Valefi Z., Jamali H., Evaluation of hot corrosion behavior of plasma sprayed and laser glazed YSZ–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thermal barrier composite. *Opt. Laser Technol.* 2019;11687–695, 2017.
- Aristizabal M., Rodriguez N., Ibarreta F., Martinez R., Sanchez J.M., Liquid phase sintering and oxidation resistance of WC-Ni-Co-Cr cemented carbides. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 28(4):516–522, 2010.
- Bolelli G., Berger L.M., Bonetti M., Lusvarghi L., Comparative study of the dry sliding wear behaviour of HVOF-sprayed WC-(W,Cr)<sub>2</sub>C-Ni and WC-CoCr hardmetal coatings. *Wear* 309(1–2):96–111, 2014.
- Carpio P., Bannier E., Salvador M.D., Benavente R., Sánchez E., Multilayer and Particle Size-Graded YSZ Coatings Obtained by Plasma Spraying of Micro- and Nanostructured Feedstocks. *J. Therm. Spray Technol.* 23(8):1362–1372, 2014.
- Chen H., Liu Y., Zhang L., Li X., Li Z., Hot corrosion behavior of a NiCrAlY/ZrO<sub>2</sub> coating on a Ni-based superalloy at 900°C. *Journal of Alloys and Compounds.* 749, 314-322, 2018.
- Del Campo L., Pérez-Sáez R.B., González-Fernández L., Tello M.J., Kinetics inversion in isothermal oxidation of uncoated WC-based carbides between 450 and 800 °C. *Corros. Sci.* 51(4),707–712, 2009.
- Doleker K.M., Karaoglanli A.C., Comparison of oxidation behavior of YSZ and Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> thermal barrier coatings (TBCs). *Surf. Coatings Technol.* 318:198–207, 2017.
- Doleker K.M., Karaoglanli A.C., Ozgurluk Y., Kobayashi A., Performance of single YSZ, Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> and double-layered YSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> thermal barrier coatings in isothermal oxidation test conditions. *Vacuum* 177,109401, 2020.
- Doleker K.M., Ozgurluk Y., Ahlatci H., Karaoglanli A.C., Isothermal Oxidation Behavior of Gadolinium Zirconate (Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) Thermal Barrier Coatings (TBCs) produced by Electron Beam Physical Vapor Deposition (EB-PVD) technique. *Open Chem.* 16(1):986–991, 2018.
- Doleker K.M., Ozgurluk Y., Kahraman Y., Karaoglanli A.C., Oxidation and hot corrosion resistance of HVOF/EB-PVD thermal barrier coating system. *Surf. Coatings Technol.* 409:126862, 2021.
- Doleker K.M., Ozgurluk Y., Karaoglanli A.C., Isothermal oxidation and thermal cyclic behaviors of YSZ and double-layered YSZ/La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> thermal barrier coatings (TBCs). *Surf. Coatings Technol.* 351:78–88, 2018.
- Ghadami F., Sohi M.H., Ghadami S., Effect of bond coat and post-heat treatment on the adhesion of air plasma sprayed WC-Co coatings. *Surf. Coatings Technol.* 261:289–294, 2015.

- Habibi M.H., Wang L., Liang J., Guo S.M., An investigation on hot corrosion behavior of YSZ-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> salt at 1100°C. *Corros. Sci.* 75:409–414, 2013.
- Hu S., Finklea H., Liu X., A review on molten sulfate salts induced hot corrosion. *J. Mater. Sci. Technol.* 90:243–254, 2021.
- Kalush A., Texier D., Ecochard M., Sirvin Q., Choquet K., Gheno T., Vanderesse N., Jomaa W., Bocher P., Size effects on high temperature oxidation of MCrAlY coatings processed via APS and HVOF depositions. *Surf. Coatings Technol.* 440:128483, 2022.
- Karaoglanli A.C., Doleker K.M., Ozgurluk Y., State of the art thermal barrier coating (TBC) materials and the failure mechanisms. In: *Advanced Structured Materials*. Vol 33, 441–452, 2017.
- Kaur M., Singh H., Prakash S., High-temperature corrosion studies of HVOF-sprayed Cr 3C 2-NiCr coating on SAE-347h boiler steel. *J. Therm. Spray Technol.* 18(4), 619–632, 2009.
- Kaushal G., Singh H., Prakash S., High-temperature erosion-corrosion performance of high-velocity oxy-fuel sprayed Ni-20 Cr coating in actual boiler environment. *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 42(7), 1836–1846, 2011.
- Kiatisereekul A., Fakpan K., High temperature erosion of T22 steel coated by Cr–Ni electroplating, HVOF sprayed stellite–6 and WC–12Co. *Mater. Today Proc.* 52, 2523–2528, 2022.
- Kim J. H., J. Kim W., Kim K. J., Effects of hot corrosion on the mechanical properties of coated superalloy IN738LC, *Journal of Mechanical Science and Technology.* 31, 5, 2275–2281, 2017.
- Lashmi P.G., Majithia S., Shwetha V., Balaji N., Aruna S.T., Improved hot corrosion resistance of plasma sprayed YSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> thermal barrier coating over single layer YSZ. *Mater. Charact.* 147, 199–206, 2019.
- Liu X., Hu K., Zhang S., Xu T., Chen L., Byon E., Liu D., Study of KCl-induced hot corrosion behavior of high velocity oxy-fuel sprayed NiCrAlY and NiCrBSi coatings deposited on 12CrMoV boiler steel at 700 °C. *Corros. Sci.* 203, 110351, 2022.
- Lyphout C., Björklund S., Internal Diameter HVOF Spraying for Wear and Corrosion Applications. *J. Therm. Spray Technol.* 24(1–2), 235–243, 2014.
- Ma N., Guo L., Cheng Z., Wu H., Ye F., Zhang K., Improvement on mechanical properties and wear resistance of HVOF sprayed WC-12Co coatings by optimizing feedstock structure. *Appl. Surf. Sci.* 320, 364–371, 2014.
- Mahesh R.A., Jayaganthan R., Prakash S., Microstructural characterization and hardness evaluation of HVOF sprayed Ni-5Al coatings on Ni- and Fe-based superalloys. *J. Mater. Process. Technol.* 209(7), 3501–3510, 2009.
- Niihara K., A fracture mechanics analysis of indentation-induced Palmqvist crack in ceramics. *J. Mater. Sci. Lett.* 2(5), 221–223, 1983.
- Ozgurluk Y., Doleker K.M., Karaoglanli A.C., Hot corrosion behavior of YSZ, Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> and YSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> thermal barrier coatings exposed to molten sulfate and vanadate salt. *Appl. Surf. Sci.* doi:10.1016/j.apsusc, 09, 047, 2018.
- Ozgurluk Y., Doleker K.M., Karaoglanli A.C., Hot corrosion behavior of YSZ, Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> and YSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> thermal barrier coatings exposed to molten sulfate and vanadate salt. *Appl. Surf. Sci.* 438, 96–113, 2018.
- Ozgurluk Y., Investigation of oxidation and hot corrosion behavior of molybdenum coatings produced by high-velocity oxy-fuel coating method. *Surf. Coatings Technol.* 444, 128641, 2022.
- Patil A.R., Vagge S.T., Hot corrosion behaviour of Inconel 738 superalloy in presence of NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. *Mater. Today Proc.* doi:10.1016/J.MATPR. 05, 068, 2022.

- Peng H., Wang L., Guo L., Miao W., Guo H., Gong S., Degradation of EB-PVD thermal barrier coatings caused by CMAS deposits. *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.* 22(5),461–467, 2012.
- Pulsford J., Venturi F., Pala Z., Kamnis S., Hussain T., Application of HVOF WC-Co-Cr coatings on the internal surface of small cylinders: Effect of internal diameter on the wear resistance. *Wear* 432–433,202965, 2019.
- Saremi M., Valefi Z., Abaeian N., Hot corrosion, high temperature oxidation and thermal shock behavior of nanoagglomerated YSZ-Alumina composite coatings produced by plasma spray method. *Surf. Coatings Technol.* 221,133–141, 2013.
- Sidhu H.S., Singh Sidhu B., Prakash S., The role of HVOF coatings in improving hot corrosion resistance of ASTM-SA210 GrA1 steel in the presence of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> salt deposits. *Surf. Coatings Technol.* 200(18–19), 5386–5394, 2006.
- Singh S., Goyal K., Bhatia R., A review on protection of boiler tube steels with thermal spray coatings from hot corrosion. *Mater. Today Proc.* 56, 379–383, 2022.
- Song B., Murray J.W., Wellman R.G., Pala Z., Hussain T., Dry sliding wear behaviour of HVOF thermal sprayed WC-Co-Cr and WC-CrxCy-Ni coatings. *Wear* 442–443, 203114, 2020.
- Souza V.A.D., Neville A. Mechanisms and kinetics of WC-Co-Cr high velocity oxy-fuel thermal spray coating degradation in corrosive environments. *J. Therm. Spray Technol.* 15(1),106–117, 2006.
- Sundararajan T., Kuroda S., Abe F., Steam oxidation resistance of two-layered Ni-Cr and Al APS coating for USC boiler applications. *Corros. Sci.* 47(5),1129–1147, 2005.
- Testa V., Morelli S., Bolelli G., Bosi F., Puddu P., Colella A., Manfredini T., Lusvardi L., Corrosion and wear performances of alternative TiC-based thermal spray coatings. *Surf. Coatings Technol.* 438,128400, 2022.
- Vuoristo P.M., High velocity sprays boost hardmetal industrial coatings. *Met. Powder Rep.* 62(3), 22–29, 2007.
- Wang Q., Zhou D., Yu M., Shi L., Li X., Sun Q., Oxidation and hot corrosion behaviors of Mo-doped NiMoAlY alloys at 750 °C. *Corros. Sci.* 201,110262, 2022.
- Wiesner V.L., Scales D., Johnson N.S., Harder B.J., Garg A., Bansal N.P., Calcium–magnesium aluminosilicate (CMAS) interactions with ytterbium silicate environmental barrier coating material at elevated temperatures. *Ceram. Int.* 46(10),16733–16742, 2020.
- Wood R.J.K., Tribology of thermal sprayed WC-Co coatings. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 28(1), 82–94, 2010.
- Yang K., Chen C., Xu G., Jiang Z., Zhang S., Liu X., HVOF sprayed Ni–Mo coatings improved by annealing treatment: microstructure characterization, corrosion resistance to HCl and corrosion mechanisms. *J. Mater. Res. Technol.* 19,1906–1921, 2022.
- Zhao L., Maurer M., Fischer F., Dicks R., Lugscheider E., Influence of spray parameters on the particle in-flight properties and the properties of HVOF coating of WC-CoCr. *Wear* 257(1–2),41–46, 2004.
- Zou Z., Donoghue J., Curry N., Yang L., Guo F., Nylén P., Zhao X., Xiao P., A comparative study on the performance of suspension plasma sprayed thermal barrier coatings with different bond coat systems. *Surf. Coatings Technol.* 275,276–282, 2015.

---

**Araştırma Makalesi / Research Article**

---

**Effect of Boron-Aluminide Coating Applied on R4 Grade Offshore Mooring Chain Steel on Pitting and Tribo-Corrosion Behaviour**

Sabri ALKAN\*

Bandırma Onyedİ Eylül Üniversitesi, Denizcilik Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü,  
Balıkesir, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1052-4778>, salkan@bandirma.edu.tr

**Geliş/ Received:** 13.05.2023;

**Kabul / Accepted:** 28.05.2023

**ABSTRACT:** Offshore mooring systems are susceptible to wear, corrosion, and fatigue damage, making improving their tribocorrosion resistance essential. This study aims to evaluate the effects of boron-aluminizing treatment on the corrosion and tribocorrosion resistance of R4 steel in a marine environment. The boron-aluminide coating was characterized by SEM, EDS, and XRD, revealing the presence of FeAl as the dominant phase with minor amounts of FeB, Fe<sub>2</sub>B, and Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> phases. Results showed that the boron-aluminide coating improved the corrosion resistance of R4 steel, acting as a barrier between the coating and the steel substrate and maintaining its corrosion resistance even under wear conditions. The findings suggest that the boron-aluminide coating can potentially improve the corrosion and tribocorrosion resistance of R4 steel in marine environments, making it a cost-effective alternative to passive materials for the thermochemical coating of low-alloy steels.

**Keywords:** HSLA steel, boro-aluminizing, corrosion, tribocorrosion, seawater

---

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: salkan@bandirma.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Alkan, S. (2023). Effect of Boron-Aluminide Coating Applied on R4 Grade Offshore Mooring Chain Steel on Pitting and Tribo-Corrosion Behaviour. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 302-317.



## 1. INTRODUCTION

The structural stability of floating offshore structures can be compromised by various factors, which can have catastrophic consequences. One of the leading causes of malfunctions in these structures is the damage to the mooring systems due to wear, corrosion and fatigue (Angulo et al., 2019). The links and accessories of mooring chains experience corrosion and wear as they move against each other in the dynamic marine environment, including factors like tides, waves, and currents (Alkan, 2017). Synergistic interaction between wear and corrosion speeds up each other, and material loss occurs more than in wear-alone or corrosion-alone situations (Ma et al., 2013; López-Ortega et al., 2018; Jiajia et al., 2019; Zhang and Hoogeland, 2019; Du et al., 2020). This phenomenon is known as tribocorrosion. Understanding the tribocorrosion behaviour of offshore mooring components and enhancing their tribocorrosion resistance is crucial due to replacement challenges and maintenance costs (Moghaddam et al., 2020).

Offshore mooring chains are manufactured using high-strength, low-alloy (HSLA) steel in six grades selected based on their strength properties (IACS, 2013). The alloy content of conventional carbon steels is low, and their elemental content is insufficient to form a passive protective oxide layer on their surface. For this reason, to slightly improve the corrosion resistance of typical low-alloy carbon steel, it is therefore recommended by the standards that HSLA offshore mooring steels have at least 20% molybdenum (IACS, 2013). However, the oxide layer on the surfaces of low-alloy carbon steels is not pretty protective as passive alloys, such as stainless steels, and it may decompose by mechanical effects in aggressive electrolytes. On the other hand, the ferric oxyhydroxide layer, known as rust, that develops on the carbon steel accumulates, especially in the non-abraded areas in tribocorrosion, due to the continuously developing corrosion. This rust layer causes a decrease in the corrosion rate, behaving as a coating after a certain level. This situation also causes a galvanic cell due to the potential difference between worn and unworn parts, creating micro or macro pits on the corroded surfaces. Macro or micro pits may cause a decrease in the cross-sectional areas and increases global and local tensions in the structure.

The ability of passive materials to regenerate the oxide film (repassivation), which is broken due to mechanical effects under tribocorrosion conditions, puts them in the class of corrosion and tribocorrosion-resistant materials. However, passive alloys like stainless steel and titanium are costly material groups for tribocorrosive environments compared to low-alloy carbon steels, and using these costly materials is not feasible for sizeable offshore mooring systems. To overcome this issue, thermochemical surface modifications are promising alternatives to increase the tribocorrosion resistance of HSLA carbon steels instead of costly passive materials for the marine environment (Shen et al., 2016; Günen et al., 2018; Shen et al., 2018; López-Ortega et al., 2018; López-Ortega et al., 2018; López-Ortega et al., 2019; Pandim et al., 2020). One of the most promising ways is the thermochemical coating of low alloy steels with inert boride layers after aluminizing heat treatment (Günen et al., 2022). In addition to being resistant to many corrosive liquids, boroaluminizing can also increase the tribocorrosion resistance of HSLA mooring chain steels cost-effectively. This study aims to understand the pitting and tribocorrosion behaviour of HSLA steel and improve the tribocorrosion resistance in seawater by boroaluminizing.

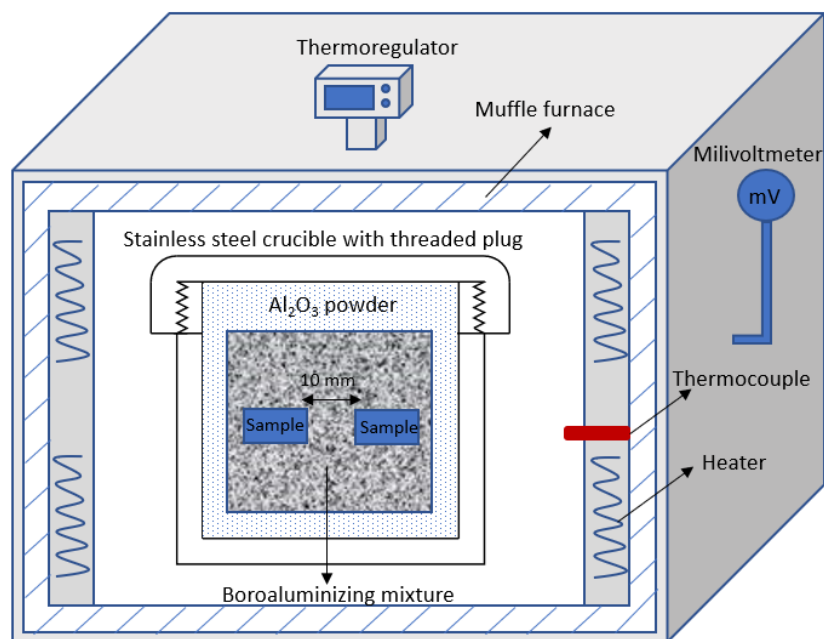
## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Sample preparation and coating process

The R4 grade HSLA mooring chain steel was chosen as the base material as it is widely employed in practical applications. Furthermore, HSLA steels can be used for the pack boroaluminizing procedure. The R4 grade mooring chain steel was accurately sectioned into 23 x 10 mm pieces with a thickness of 10 mm using a precise cutting tool to prepare it for coating. The pack cementation method was used to form a boron-aluminide layer on the substrate. After being appropriately ground with 320-400-600-800-1000-1200 SiC sheets, the samples' surfaces underwent a 15-minute ultrasonic cleaning procedure in an alcohol bath.

The boroaluminizing technique uses 45%  $B_4C$ , 5%  $NaBF_4$  for boronizing and 22.5% aluminium, 22.5%  $Al_2O_3$  and 5%  $NH_4Cl$  for aluminizing. Based on boronizing powders and aluminizing powders used in previous studies, the powders were prepared in a 1/1 ratio (Güven et al., 2022). The specimens were placed inside stainless steel containers known as crucibles. Then, a 10 mm thick coating of boro-aluminizing powder was spread around each piece on all sides to generate a layer of boron-aluminide. After that, the crucibles containing the samples were inserted into a furnace heated to the aluminizing temperature of 900 °C. The crucibles were firmly attached with fasteners and left inside the furnace for two hours. Subsequently, the furnace was turned off, and the crucible was taken out and left to cool down to room temperature. Once the samples were cooled, any remaining dust was removed from their surfaces. A diagram of the boroaluminizing process is shown in Fig. 1.

To prepare the samples, they were first embedded in bakelite and then ground using SiC ground paper ranging in size from 320G to 2000G. The ground samples were then polished with  $Al_2O_3$  solutions of 3  $\mu m$  and 1  $\mu m$  until a reflective surface was achieved. Next, they were submerged in a 5% Nital solution for 6 seconds, which allowed the intricate features of the microstructure to become visible.



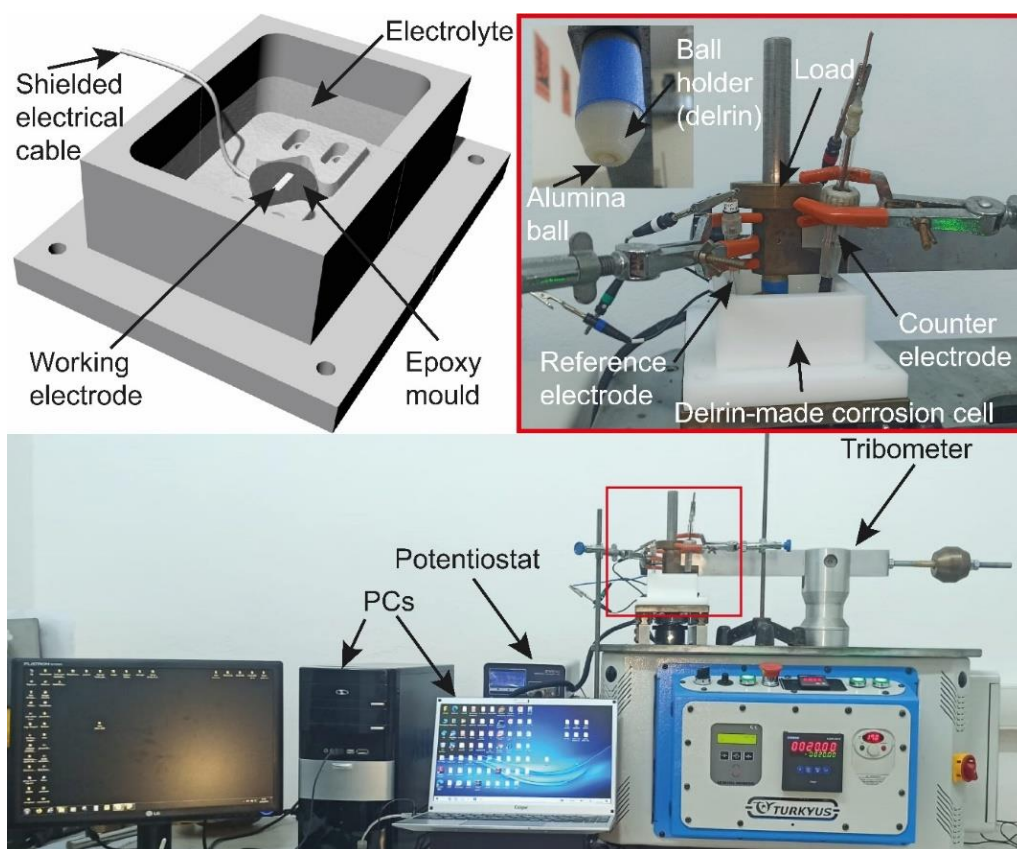
**Figure 1.** Schematic illustration of the boro-aluminizing setup and process

The microstructural properties and distribution of elements in the coating layer were investigated using SEM (MAIA3 XMU-TESCAN) and EDS (X-Max-OXFORD) analysis. EDS

analysis was utilized to examine how the alloying elements were distributed in the coating layer. The coating thickness was determined by measuring an average of five samples using the Fiji ImageJ measurement tool based on SEM images. To investigate the XRD patterns, Cu K radiation with a wavelength of 0.154 nm, a scan step size of 0.0525211, and 2 angles ranging from 10 to 90° were used with the Rigaku Smart Lab™.

## 2.2 In-situ corrosion and tribocorrosion test procedure

A reciprocating tribometer (TURKYUS) combined with a potentiostat was used to assess the tribocorrosion behaviour of HSLA steel samples with and without boron-aluminide coating in marine environments. As illustrated in Fig. 2, the experimental setup was designed to simultaneously measure wear and corrosion data during the tests (Alkan, 2022a). A 3.5% sodium chloride solution was prepared to simulate seawater for the corrosion and tribocorrosion investigations. A Delrin (a polymer material) cell containing 150 ml of the electrolyte was used for each test to avoid any unwanted electrochemical effects.



**Figure 2.** Setup for triboelectrochemical tests (Alkan, 2022a)

In order to conduct the sliding tests, an alumina ball (6.35 mm diameter and 14 GPa hardness) was employed as the abrasive counter body. The tests were carried out at a speed of 0.02 m/s and a sliding stroke of 6 mm, which resulted in a total wear path of 36 m under a normal load of 5 N. The samples were made sure to have a 2.3 cm<sup>2</sup> contact surface by coating with epoxy and then placed in a corrosion cell composed of Delrin for one hour to measure OCP. In the corrosion and tribocorrosion assessments, the coated or uncoated R4 steel samples were used as the working electrode, while platinum acted as the reference electrode and Ag/AgCl as the counter electrode. A conventional three-electrode system was used for the electrochemical tests, and the Zive SP1 analyzer test equipment

was utilized to examine the findings. The ASTM G5-14 standard was used to evaluate the electrochemical values of OCP, corrosion potential, and current density.

In this study, the impact of sliding wear on the corrosion rates of simulated seawater was investigated. Potentiodynamic polarization tests were performed under 5 N loads with scan rates of 0.166 mV/s to evaluate the corrosion resistance. The potentials ranged from 0.5 V to -1 V relative to each sample's OCP (vs Ag/AgCl). Before corrosion and tribocorrosion testing, all specimens were immersed and stabilized in the electrolyte for 3600 seconds. Each test was repeated thrice to ensure accuracy, and the average was calculated. The experiments were conducted at a temperature of  $23 \pm 2$  °C to maintain the consistency in the results.

### 2.3 Assessment of surface morphology

Following the tribocorrosion tests, the wear track dimensions were measured using a 3D laser scanning microscope from Filmetrics to determine the wear morphology. An SEM (Scanning Electron Microscope) device attached with EDS capability was also utilized to study the surface morphology of the tested samples after each test.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 Coating Characterization

Figure 3 shows the boron-aluminide layer's morphology, SEM cross-section, and EDS analysis. The boro-aluminizing process produced three visible zones, determined through EDS line analysis. Within the coating layer's 0-10  $\mu\text{m}$  range, the first zone contains a distribution of approximately 70% B, 15% Fe, and 15% Al atoms at the atomic level throughout the layer. The second zone, a FeAl layer, contains equal amount of Al and Fe about (%45-50) and is located in the 10-50 micrometres range. It is clearly observed that the aluminium ratio in this region decreases as it moves away from the surface. The third region is the matrix structure unaffected by the boro-aluminizing process. It is thought that the boron content detected within this region is possibly due to the difficulty of distinguishing boron from carbon in the substrate material using EDS. Ouladsaad et al. (2019) reported that XC38 steel obtained a 44  $\mu\text{m}$  thick boro-aluminide coating layer after boro-aluminizing at 900 °C for 4 hours. Thus, the coating layer produced in the research aligns with the findings in previous literature.

The EDS analysis demonstrated that the coatings had a significant amount of Al post-boron-aluminizing but lower concentrations of Fe and B within the coating layer. These EDS results supported the XRD analysis, which identified FeAl as the dominant phase in the structure with minor amounts of FeB, Fe<sub>2</sub>B, and Fe<sub>5</sub>Al<sub>8</sub> phases present. Spot EDS analyses of Fe-Al-B, Fe-Al, and the substrate material indicated that the surface layer was mainly composed of B with low levels of Fe and Al. In contrast, the second layer was composed of Fe-Al, indicating that the temperature required for aluminizing was lower than that for boronizing, leading to the formation of a Fe-Al layer on the surface followed by the beginning of boron diffusion and a decrease in Al diffusion. The substrate material contained Cr, Mn, Mo, and Fe, which were part of the grade R4 steel chemical composition and were detected through EDS analysis.

Fig. 4 illustrates the X-ray diffraction (XRD) pattern of both R4 steel and the boron-aluminide coating. As seen in Fig. 4, it was determined that R4 steel consists of ferrite and iron peaks. After boron-aluminizing, it was found that the dominant phase in the samples is FeAl, and minor amounts of FeB, Fe<sub>2</sub>B, and Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> phases are also present in the structure, as reported previously (Öksüzöğlü and Döleker, 2021). The coating structure also included FeAl<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, FeAl, and Al<sub>5</sub>FeNi phases.

FeAl and Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> phases on the surface are noteworthy since they can maintain their stability even at high temperatures, suggesting that the coating may have potential applications in high-temperature environments (Yener et al., 2019; Erdogan et al., 2021).

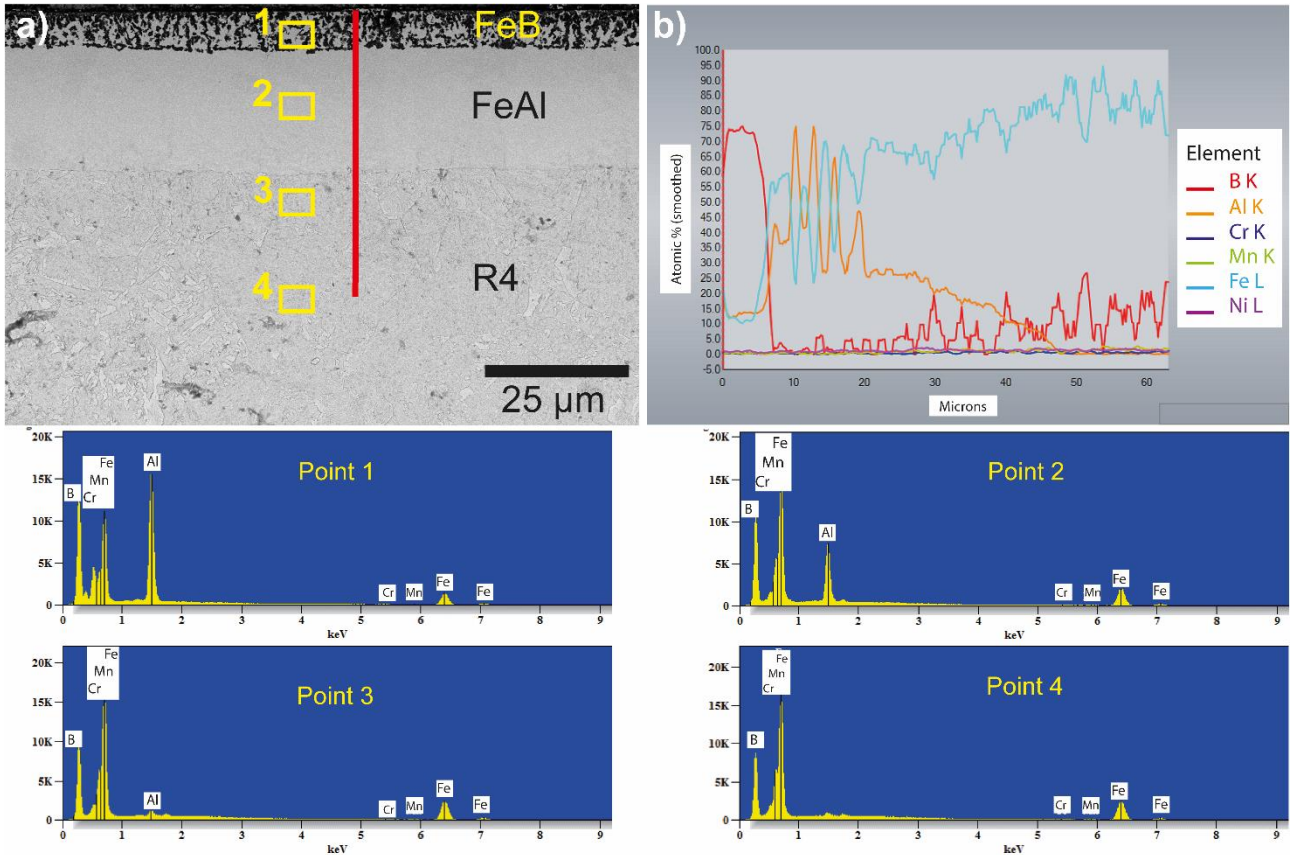


Figure 3. The microstructure and elemental composition of the boron-aluminized R4 sample

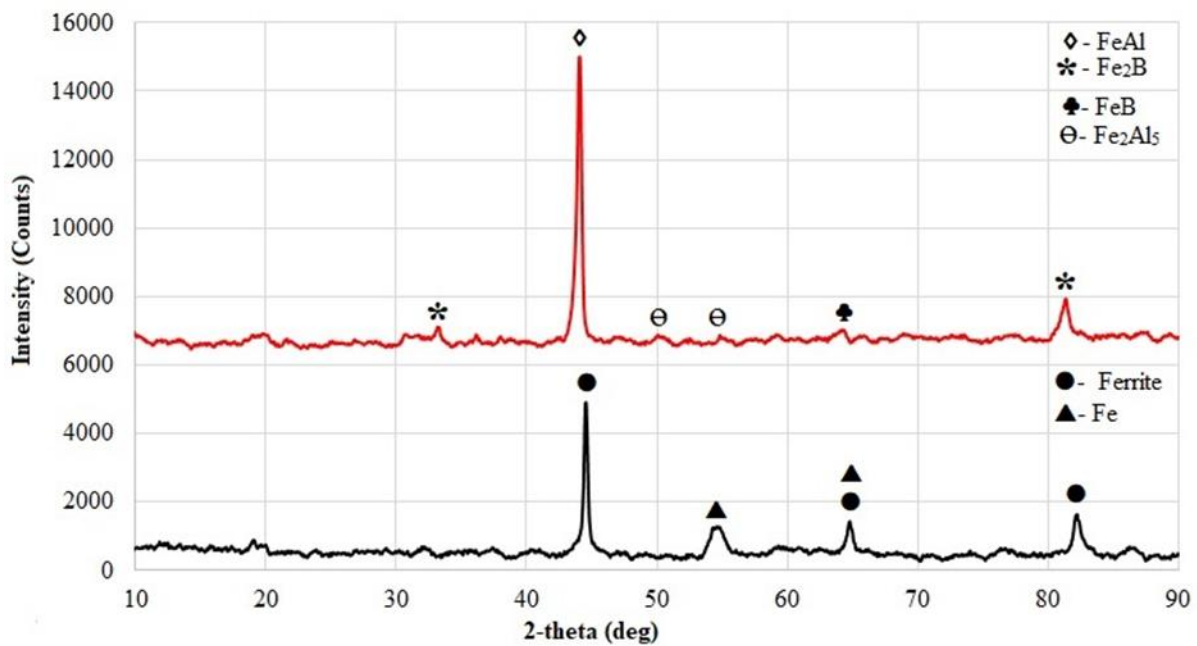
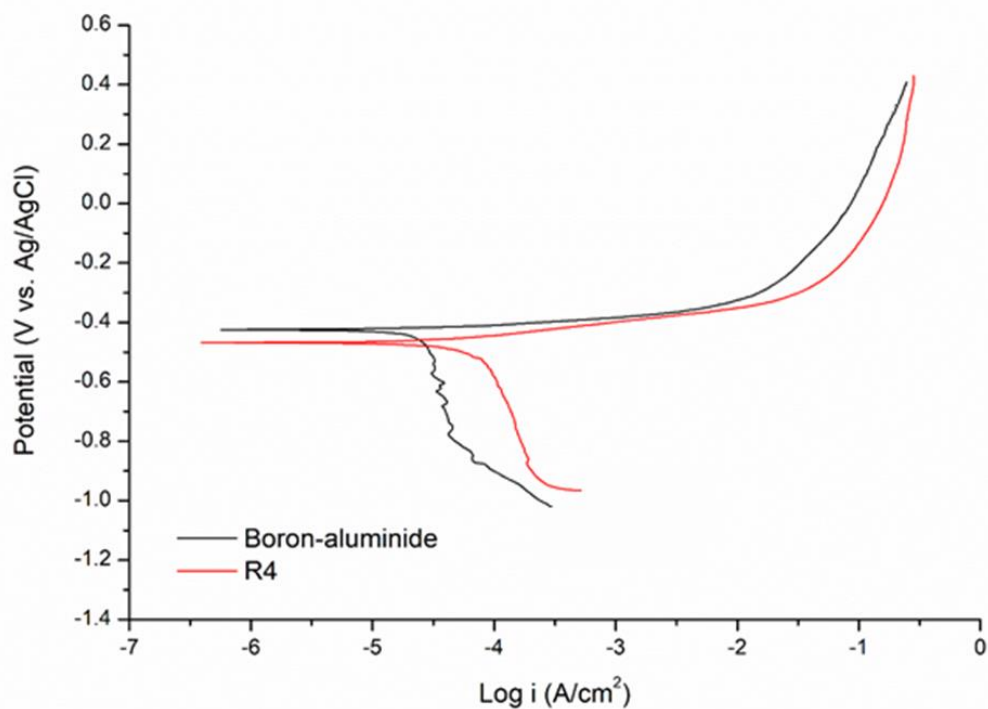


Figure 4. X-ray diffraction (XRD) analysis for R4 steel and boron-aluminide coating

### 3.2 Potentiodynamic polarization

The electrochemical behaviour of R4 steel and boro-aluminized R4 in 3.5% NaCl solution was investigated using Tafel plots, as shown in Fig. 5. The polarization curves obtained from the tests were used to analyze the kinetics of corrosion over a range of potentials from 0.5 V to -1 V. Table 1 summarizes the electrochemical data obtained from the polarization curves. The findings suggested that, although the corrosion potential values of the boron-aluminide coating were similar to those of the substrate, the corrosion current density was roughly double. However, the boron-aluminide coating enhanced the corrosion resistance of R4 steel, leading to lower corrosion currents, better corrosion resistance, and lower corrosion rates than untreated R4. The boron-aluminide ceramic structure and higher chemical stability in the NaCl electrolyte acted as a barrier between the coating and the steel substrate, contributing to enhanced corrosion resistance (López-Ortega et al., 2018). These results suggest that the boron-aluminide coating can improve the corrosion resistance of R4 steel in marine environments characterized by simultaneous wear and corrosion.



**Figure 5.** The Potentiodynamic scans of R4 and boron-aluminide coating under corrosion conditions

**Table 1.** The electrochemical data obtained from polarization curves in a 3.5% NaCl solution

	<b>R4</b>	<b>Boro-aluminized R4</b>
<b>E<sub>corr</sub> (mV)</b>	-479	-424
<b>I<sub>corr</sub> (A/cm<sup>2</sup>)</b>	2.12E-5	1.35E-5
<b>Corr. Rate (mmpy)</b>	0.4730	0.2913

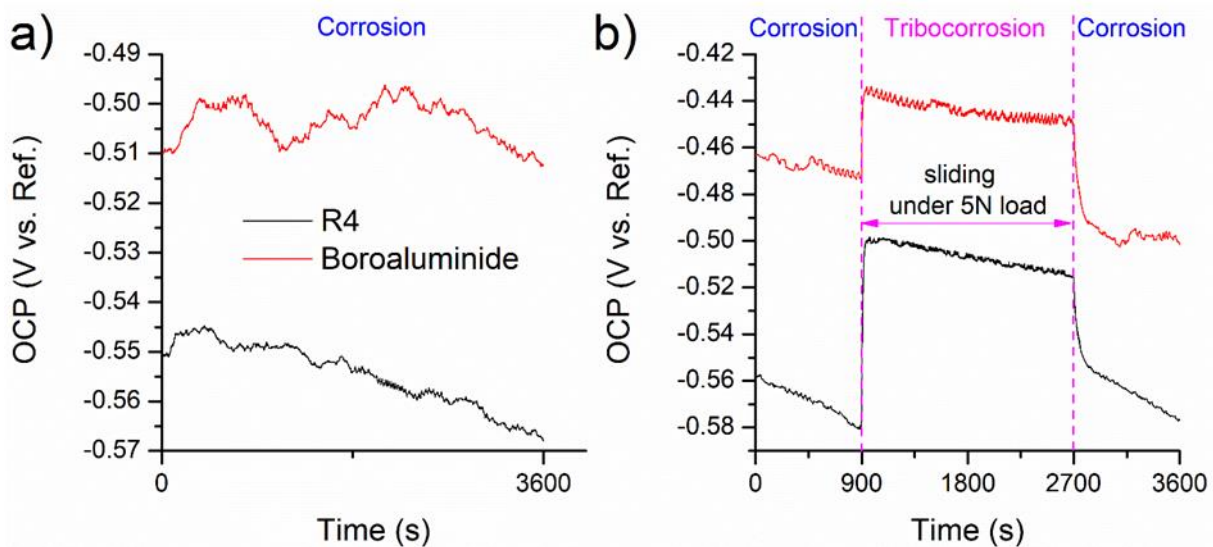
### 3.3 Assessment of OCP during corrosion and tribocorrosion

Fig. 6 (a) displays the OCPs of R4 steel and boron-aluminide coated samples immersed in a 3.5% NaCl solution for 3600 seconds. R4 steel experienced a decrease in electrochemical potential due to the continuous action of the corrosion process during the soaking time. In contrast, the boron-aluminide coating exhibited a more stable potential response between -0.50 V and -0.51 V in the first hour of immersion, thanks to forming an oxide layer with a barrier effect on the surface. After the

first hour, the potential of the boron-aluminide coating reached around  $-0.51$  V in a simulated marine environment, indicating excellent seawater protection.

Fig. 6 (b) illustrates the changes in OCP before, during and after sliding. As a result of the sliding motion, the electrochemical potential of R4 steel shifted towards more positive values due to the disparities between the worn and unworn surfaces. This resulted in two regions behaving like batteries, with the wear track exhibiting cathodic behaviour. The ongoing mechanical activity of the counter body controlled the corrosion kinetics in the track, leading to a decrease in the corrosion rate in the wear track region of the HSLA R4 steel. Following the sliding duration, the surface of the wear track interacted with the electrolyte, forming a fresh rust layer that enabled the material to revert to nearly its initial potential values before sliding.

During the initial 900 seconds, as shown in Fig. 6(b), the potential of the boron-aluminide coating decreased to more negative values. The onset of sliding resulted in a potential difference between the two regions, as the alumina ball continuously acted on the wear track, leading to a potential shift. The OCP of the boron-aluminide layer increased due to removing the protective layer from the wear track and the electrolyte leakage onto the steel substrate. In passive surfaces, the change in the OCP under tribocorrosion usually occurs as a potential drop, although cracks or pits formed on the coating surface can cause the electrolyte to reach the substrate metal. Towards the end of the sliding period, the potential of the boron-aluminide layer dropped around 2700 s, following the re-passivation which was facilitated by the boron-aluminide surface. Furthermore, due to the aluminium's ability to form passive layers, the boron-aluminide coating could re-passivate more effectively than R4 steel (Alkan, 2022a).



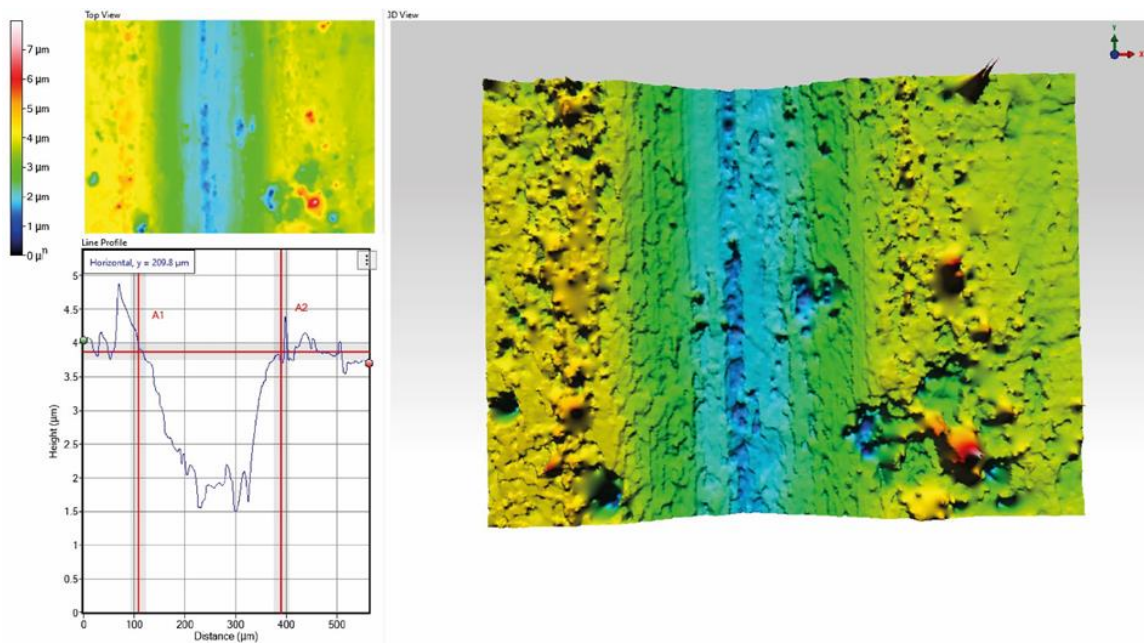
**Figure 6.** The electrochemical potential a) after being immersed in the solution for one hour and b) during the corrosion and sliding tribocorrosion

### 3.4 Examination of surface morphology

Fig. 7 displays the wear track generated on untreated R4 steel under open circuit potential (OCP) conditions after conducting tribocorrosion tests. The optical images revealed abrasive effects and micro-grooving wear marks resulting from the separation of hard oxide abrasion debris from the surface during wear, which stuck into the surface and dragged away with the counter ball. This

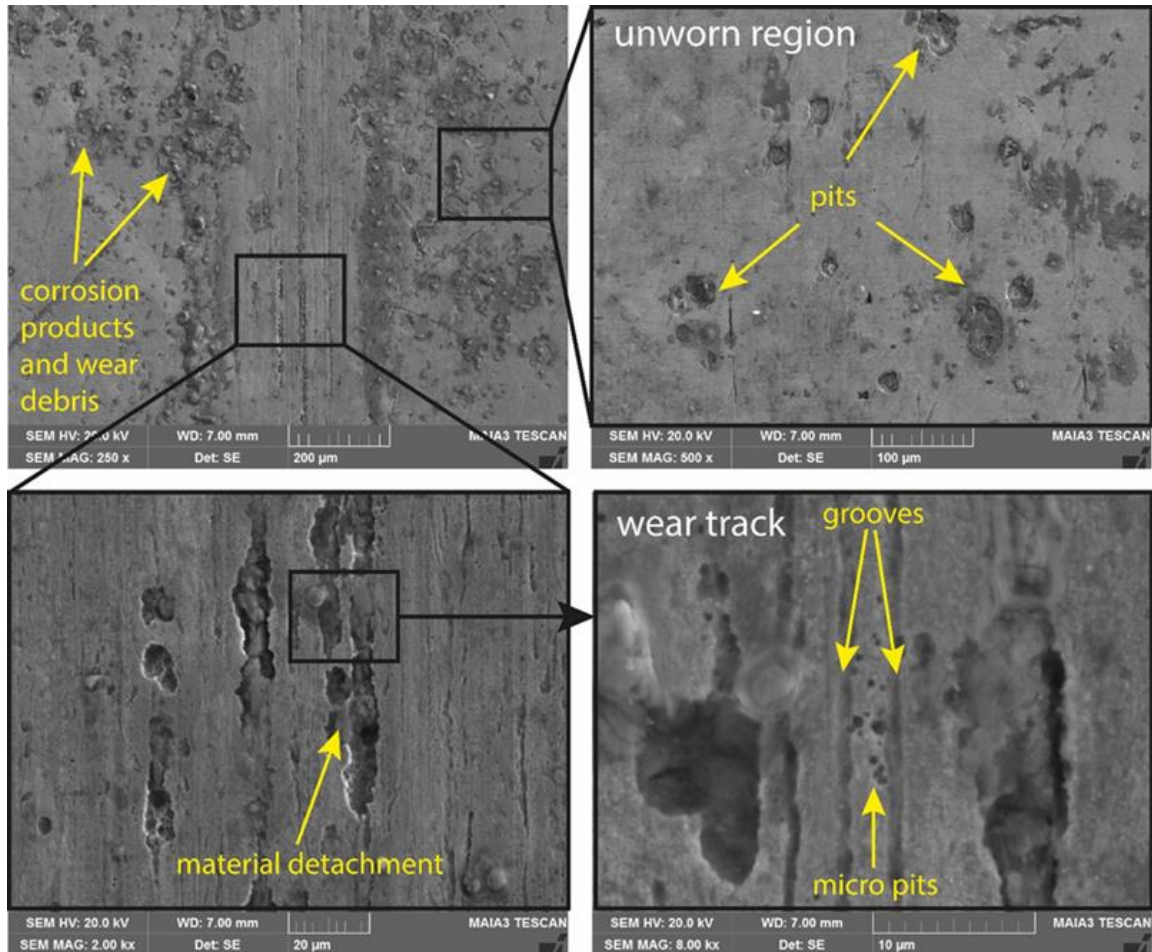
mechanism is well-documented in previous studies on materials with low surface hardness (Marques et al., 2011; Günen, 2016; Erdogan, 2019).

An SEM image of the wear track in Fig. 8 supported the presence of abrasive effects and material detaching under OCP conditions with corrosion processes. In Fig. 8, the corrosion products and wear debris were determined in the non-abraded region. These results could be attributed anodic behaviour of unworn surfaces and the cathodic behaviour of worn surfaces (Alkan and Gök, 2021). According to Fig. 8, pits in the unworn surface of R4 steel also support the idea of the high dissolution of material from the unworn surface. However, material detachments from the wear track, which would cause the formation of third bodies in the wear region, were determined. Another remarkable result obtained from Fig. 8 is the determination of clustered and developing micro pits in the wear track of R4 steel.



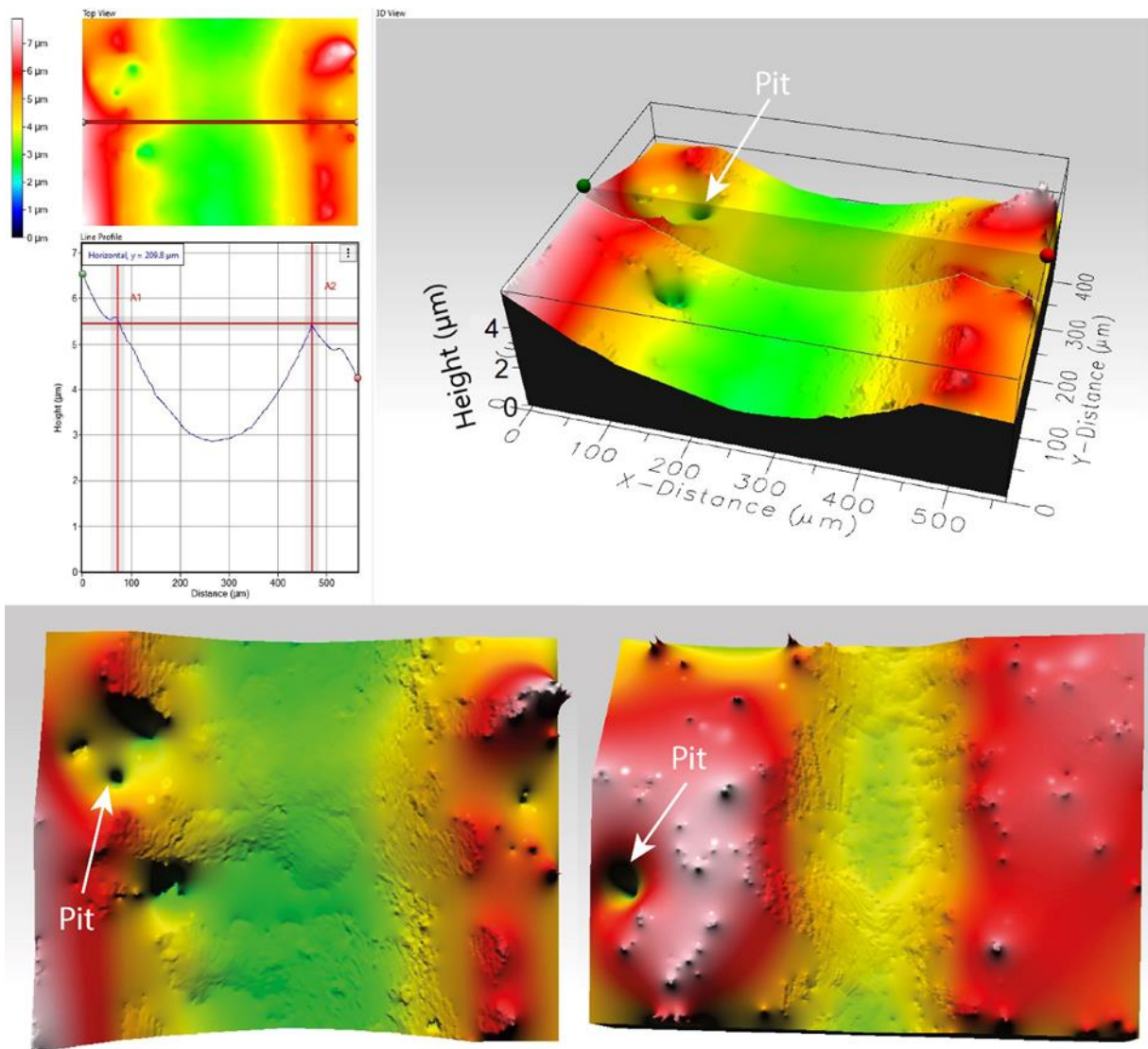
**Figure 7.** Optical microscopy captured after R4 steel tribocorrosion tests under OCP





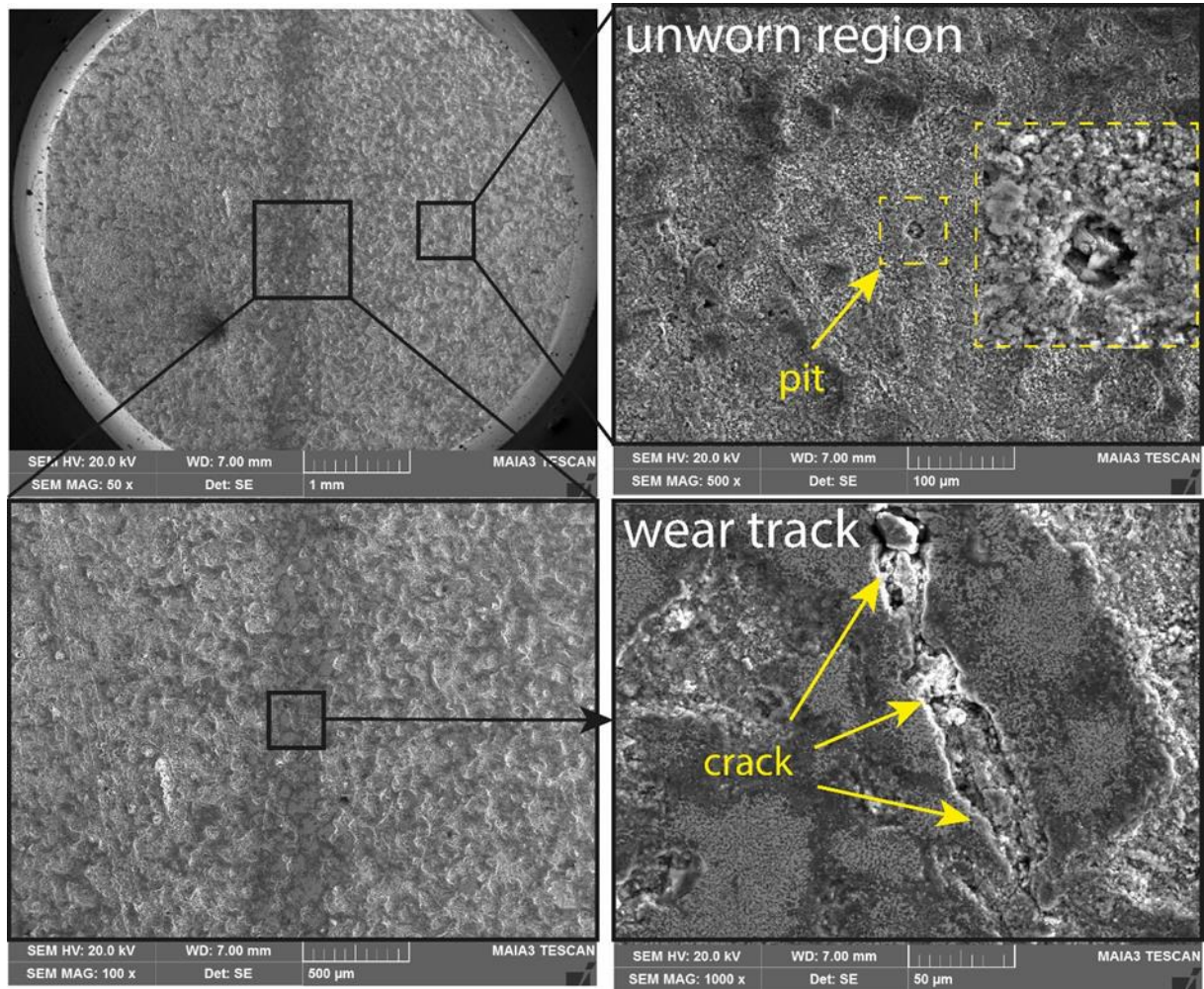
**Figure 8.** SEM photos of R4 steel following tribocorrosion testing under OCP

Fig. 9 shows the wear track generated on the boro-aluminized R4 under OCP in simulated seawater. Pits were visible inside and on the edge of the track, indicating pitting corrosion. The wear track surface morphology was smooth than the R4 steel track under OCP conditions. In addition, the wear track transverse section was consistent with the alumina ball. Although boron aluminate coating does not show an utterly passive behaviour in seawater like stainless steel, the formation of pits outside the track instead of inside the track may be evidence that the coating layer exhibits a passive-like behaviour (López-Ortega et al., 2018; Alkan, 2022a). In this case, the worn region under the effect of sliding may have exhibited anodic behaviour, while the unworn regions may have performed cathodic behaviour (López-Ortega et al., 2018; Alkan and Gök, 2022).



**Figure 9.** Optical microscope images of boro-aluminized R4 steel after open circuit potential tribocorrosion test

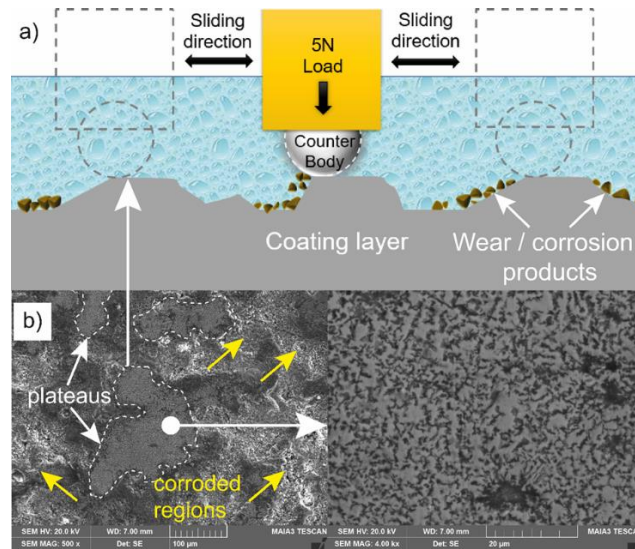
SEM images of wear tracks created on the surface of boro-aluminized R4 steel specimens after the tribocorrosion test are shown in Fig. 10. A few pits were observed in the unworn region, and their counts were clearly less than untreated R4 steel (Fig. 8). This result can be attributed to the formation of galvanic coupling between the worn and unworn surface of the boron aluminide layer and related to the cathodic behaviour of unworn regions during tribocorrosion. Fig. 10 displays cracks on the wear track with the corrosion process. This mechanism is explained in Fig. 11 to identify the tribocorrosion behaviour of the boron aluminide layer. According to Fig. 11, the boron aluminide coating has a rough surface morphology, and this rough morphology caused it to disable the contact counter body to the whole surface. Fig. 11 (a) explains the mechanism, and SEM images in Fig. 11 (b) support the proposed idea that the alumina counter body creates some plateaus. This mechanism produced wear particles and cracks in the wear track by shear force. However, the formation of the brittle  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  phase, which was formed as a minor component along with the dominant ductile  $\text{FeAl}$  phase as determined in XRD analysis, is believed to have caused the fractures in the boron-aluminide layer (Li et al., 2021). The brittle  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  intermetallic compound, which does not provide sufficient resistance against force, falls off the surface, damaging the mechanical properties of the steel under tribocorrosion conditions (Hu et al., 2006).



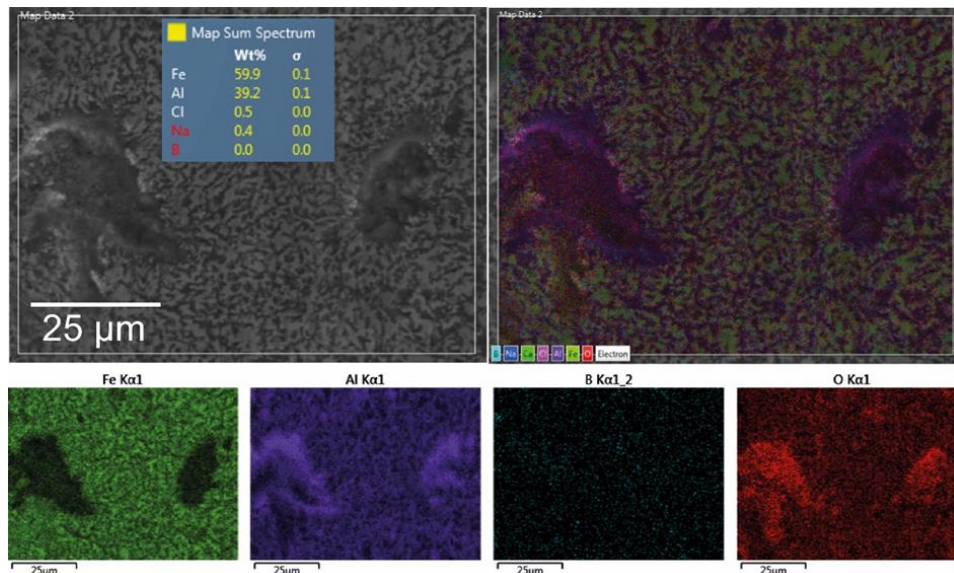
**Figure 10.** SEM images of boro-aluminized R4 steel following a tribocorrosion test conducted under OCP

An EDS analysis was conducted further to investigate the pitting corrosion behaviour and crack formation of boron aluminate coating, and Fig. 12 was created for this purpose. The pits and cracks contained oxides with Cl and Na ions, supporting the idea of marine corrosion. The leakage of Cl ions through pits and cracks would cause the anodic dissolution of the coating layer, a well-known phenomenon in marine tribocorrosion (Pardo et al., 2008; Zhang et al., 2015; Alkan, 2022b, 2022a).

Despite all wear and corrosion effects, when the wear track sections are compared (Fig. 7 and Fig. 9), it is seen that the boro-aluminized R4 steel has a very close wear depth (approximately 2.5 microns) and track width (approximately 300 microns) with the untreated sample. However, it should be noted that the corrosion-induced material loss of the boro-aluminide layer occurred mainly from the wear track, while the untreated sample was from the non-abraded region due to galvanic interactions. In this case, the total material loss of untreated R4 steel would be more than boro-aluminized R4. This result suggests that the boro-aluminide coating improved the tribocorrosion resistance of grade R4 offshore mooring steel.



**Figure 11.** Tribocorrosion mechanism in the wear track: SEM images of boro-aluminized R4 steel following a tribocorrosion test conducted under OCP



**Figure 12.** SEM and EDS images of boro-aluminized R4 steel after tribocorrosion test

#### 4. CONCLUSION

This study investigates the characteristics of the boron-aluminide coating produced on R4 steel and its effectiveness in enhancing the corrosion resistance of the substrate. Following main results can be concluded from this study. The final coating comprised of three zones: a B-rich zone, FeAl layer, and a substrate matrix. XRD analysis revealed the dominant phase of the coating to be FeAl, with minor amounts of FeB, Fe<sub>2</sub>B, and Fe<sub>5</sub>Al<sub>8</sub> phases present. The electrochemical tests indicated that the boron-aluminide coating improved the corrosion resistance of R4 steel in a 3.5% NaCl solution, leading to lower corrosion rates and better corrosion resistance than untreated R4 steel. The coating's ceramic structure and chemical stability acted as a barrier between the coating and the substrate, contributing to enhanced corrosion resistance. These results suggest that boron-aluminide coatings have the potential of application in marine environments characterized by simultaneous wear and corrosion. Additionally, the FeAl and Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> phases in the coating may have potential

applications in high-temperature environments. Overall, this study provides insights into the development of advanced coatings for improving the corrosion resistance of steel substrates.

## 5. ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank Bartın University and Prof. Dr. Mustafa Sabri Gök for the usage of laboratory infrastructure.

## 6. CONFLICT OF INTEREST

Author(s) approve that to the best of their knowledge, there is not any conflict of interest or common interest with an institution/organization or a person that may affect the review process of the paper.

## 7. AUTHOR CONTRIBUTION

The author has full responsibility for the paper in determining the concept of the research, data collection, data analysis and interpretation of the results, preparation of the manuscript, and critical analysis of the intellectual content with the final approval.

## 8. REFERENCES

- Alkan S., Comparative Hydrodynamic Analysis of Catenary and Tension Leg Moored Floating Offshore Wind Turbine. 1st International Conference on Energy Systems Engineering, November, 291–298, 2017.
- Alkan S., Enhancement of Marine Corrosion and Tribocorrosion Resistance of Offshore Mooring Chain Steel By Aluminizing Process. *Brodogradnja*, 73(4), 131–159, 2022(a).
- Alkan S., Evaluation of pitting susceptibility and tribocorrosion behaviors of AISI 304 stainless steel in marine environments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 237(4), 808-823, 2022(b).
- Alkan S., Gök M. S. (2021). Effect of sliding wear and electrochemical potential on tribocorrosion behaviour of AISI 316 stainless steel in seawater. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(2), 524–532.
- Alkan S., Gök M. S., Influence of plasma nitriding pre-treatment on the corrosion and tribocorrosion behaviours of PVD CrN, TiN and AlTiN coated AISI 4140 steel in seawater. *Lubrication Science*, 34(2), 67–83, 2022.
- Angulo Á., Tang J., Khadimallah A., Soua S., Mares C., Gan T. H., Acoustic emission monitoring of fatigue crack growth in mooring chains. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(11), 2019.
- Du J., Wang H., Wang S., Song X., Wang J., Chang A., Fatigue damage assessment of mooring lines under the effect of wave climate change and marine corrosion. *Ocean Engineering*, 206(April), 2020.
- Erdogan A., Boriding Temperature Effect on Micro-Abrasion Wear Resistance of Borided Tool Steel. *Journal of Tribology*, 141(12), 2019.
- Erdogan A., Yener T., Doleker K. M., Korkmaz M. E., Gök M. S., Low-temperature aluminizing influence on degradation of nimonic 80A surface: Microstructure, wear and high temperature oxidation behaviors. *Surfaces and Interfaces*, 25, 101240, 2021.

- Günen A., Micro-abrasion wear behavior of thermal-spray-coated steel tooth drill bits. *Acta Physica Polonica A*, 130(1), 217–222, 2016.
- Günen A., Kanca Y., Karahan İ. H., Karakaş M. S., Gök M. S., Kanca E., Çürük A., A Comparative Study on the Effects of Different Thermochemical Coating Techniques on Corrosion Resistance of STKM-13A Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 49(11), 5833–5847, 2018.
- Günen A., Keddām M., Alkan S., Erdoğan A., Çetin M., Microstructural characterization, boriding kinetics and tribo-wear behavior of borided Fe-based A286 superalloy. *Materials Characterization*, 186(February), 2022.
- Hu T. L., Huang H. L., Gan D., Lee T. Y., The microstructure of aluminized type 310 stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 3502–3509, 2006.
- IACS., Unified IACS Requirements Concerning Materials and Welding – W22 Offshore Mooring Chain. DNV-OS-E30(1993), 28, 2013.
- Jiajia W. U., Tan F., Zhang D., Yin J., Li E., Corrosion of Copper-bearing High Strength Mooring Chain Steel Affected by Microbes in Seawater. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 55(6), 1207–1216, 2019.
- Li W., Chen H., Li C., Huang W., Chen J., Zuo L., Ren Y., He J., Zhang S., Microstructure and tensile properties of AISI 321 stainless steel with aluminizing and annealing treatment. *Materials and Design*, 205, 109729, 2021.
- López-Ortega A., Arana J. L., Rodríguez E., Bayón R., Corrosion, wear and tribocorrosion performance of a thermally sprayed aluminum coating modified by plasma electrolytic oxidation technique for offshore submerged components protection. *Corrosion Science*, 143(July), 258–280, 2018.
- López-Ortega A., Areitioaurtena O., Alves S. A., Goitandia A. M., Elexpe I., Arana J. L., Bayón R., Development of a superhydrophobic and bactericide organic topcoat to be applied on thermally sprayed aluminum coatings in offshore submerged components. *Progress in Organic Coatings*, 137(September), 2019.
- López-Ortega A., Bayón R., Arana J. L., Evaluation of protective coatings for offshore applications. Corrosion and tribocorrosion behavior in synthetic seawater. *Surface and Coatings Technology*, 349(May), 1083–1097, 2018.
- López-Ortega A., Bayón R., Arana J. L., Arredondo A., Igartua A., Influence of temperature on the corrosion and tribocorrosion behaviour of High-Strength Low-Alloy steels used in offshore applications. *Tribology International*, 121(November 2017), 341–352, 2018.
- López-Ortega A., Bayón R., Arana J. L., Evaluation of protective coatings for high-corrosivity category atmospheres in offshore applications. *Materials*, 12(8), 2019.
- Ma K., Shu H., Smedley P., L’Hostis D., Duggal A., A Historical Review on Integrity Issues of Permanent Mooring Systems. *One Petro. Offshore Technology Conference*, May, 2013.
- Marques F., Da Silva W. M., Pardal J. M., Tavares S. S. M., Scandian C., Influence of heat treatments on the micro-abrasion wear resistance of a superduplex stainless steel. *Wear*, 271(9–10), 1288–1294, 2011.
- Moghaddam B. T., Hamedany A. M., Taylor J., Mehmanparast A., Brennan F., Davies C. M., Nikbin, K., Structural integrity assessment of floating offshore wind turbine support structures. *Ocean Engineering*, 208(May), 107487, 2020.
- Ouladsaad S., Allaoui O., Daas A., Boro-aluminizing of XC38 steel. *Indian Journal of Chemical Technology*, 26(3), 239–243, 2019.

- Öksüzöğlü E., Döleker K. M., 904L Paslanmaz Çeliğe Düşük Sıcaklık Alüminyumlamamanın Etkisi. *European Journal of Science and Technology*, 28, 1102–1106, 2021.
- Pandim T., Doca T., Figueiredo A. R., Pires F. M. A., Torsional fretting wear experimental analysis of a R3 offshore steel against a PC/ABS blend. *Tribology International*, 143(July 2019), 2020.
- Pardo A., Merino M. C., Coy A. E., Viejo F., Arrabal R., Matykina, E., Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels - combining effects of Mn and Mo additions. *Corrosion Science*, 50(6), 1796–1806, 2008.
- Shen H.P., Cheng X.Y., Li H., Zhang S.Y., Effect of Copper Alloy Element on Corrosion Properties of High Strength Mooring Chain Steel. *HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 and Offshore Engineering Steels 2015*, 1201–1209, 2016.
- Shen Y., Sahoo P. K., Pan Y., A study of composite coatings on 22mncrnimo steel for mooring chain. *Surface Review and Letters*, 25(3), 2018.
- Yener T., Doleker K. M., Erdogan A., High temperature oxidation behavior of low temperature aluminized Mirrax® ESR steel. *Materials Research Express*, 6(11), 2019.
- Zhang X., Hoogeland M., Influence of deformation on corrosion of mooring chain steel in seawater. *Materials and Corrosion*, 70(6), 962–972, 2019.
- Zhang Y., Yin X., Yan F., Effect of halide concentration on tribocorrosion behaviour of 304SS in artificial seawater. *Corrosion Science*, 99, 272–280, 2015.

Araştırma Makalesi / Research Article

Dimension Optimization of Polycentric Knee Mechanism Using the Bees Algorithm and Genetic Algorithm

Mert Eren AYĞAHOĞLU<sup>1\*</sup>, Mehmet Sefa GÜMÜŞ<sup>2</sup>, Abdullah ÇAKAN<sup>3</sup>, Mete KALYONCU<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7363-159X>, meaygahoglu@ktun.edu.tr

<sup>2</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2332-3745>, msgumus@ktun.edu.tr

<sup>3</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3923-4069>, acakan@ktun.edu.tr

<sup>4</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2214-7631>, mkalyoncu@ktun.edu.tr

Geliş/ Received: 28.01.2023;

Kabul / Accepted: 29.05.2023

**ABSTRACT:** In knee prostheses, the curve of the instantaneous center of rotation (ICR) and, therefore, stability of the prosthesis are the most important parameters to be considered. The ICR curve depends on many parameters. One of them and the most effective one is the dimensions of four bar mechanism. In polycentric knee mechanisms, it has become inevitable to use optimization techniques while determining the dimensions of the mechanism for the stability of the prosthesis in the stance position. In this study, definitions of knee prostheses and polycentric knee mechanisms are given, optimization studies written in this field are mentioned thorough literature research. The study aims to find mechanism dimensions that gives ICR curve close to the reference curve by optimizing the mechanism dimensions of four-bar knee mechanisms. The Bees Algorithm and Genetic Algorithm (GA) were used for this purpose. The limits and objective function for the optimization were determined, and after many trials, separate mechanism dimensions with The Bees Algorithm and the Genetic Algorithm are obtained. By comparing the results, it has been observed that the dimensions obtained by The Bees Algorithm produced a better approximation to the reference instantaneous center of rotation curve.

**Keywords:** Knee Prosthesis, Polycentric Knee, Four-Bar Mechanism, Lower-Limb Prosthesis, Voluntary Control, Instantaneous Center of Rotation

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: meaygahoglu@ktun.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Ayğahoğlu, M.E., Gümüş, M.S., Çakan, A., Kalyoncu, M. (2023). Dimension Optimization of Polycentric Knee Mechanism Using the Bees Algorithm and Genetic Algorithm. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 318-332.



## **Dört Çubuk Mekanizmalı Diz Protezlerinin Arı Algoritması ve Genetik Algoritma ile Boyut Optimizasyonu**

**ÖZET:** Diz protezlerinde kullanılan dört çubuk mekanizmalarda duruş durumunda ani dönme merkezi koordinatları ve buna bağlı olarak amputenin dengesi dikkat edilmesi gereken en önemli parametredir. Ani dönme merkezi eğrisi birçok parametreye bağlıdır. Bunların arasından dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden biri de mekanizmanın boyutlarından geçmektedir. Dört çubuk mekanizmasının kullanıldığı diz protezlerinde duruş konumunda amputenin dengede olması için mekanizmanın boyutları belirlenirken optimizasyon tekniklerinin kullanılması kaçınılmaz bir hal almıştır. Bu çalışmada, diz protezleri ve diz protezlerinde kullanılan dört çubuk mekanizmaları hakkında tanımlamalar verilmiş, literatür araştırması yaparak bu alanda yazılan optimizasyon çalışmalarından bahsedilmiştir. Yapılan çalışma, diz protezlerinde kullanılan dört çubuk mekanizmanın sentezini yaparak referans ani dönme merkezi eğrisine yakın mekanizma boyutları bulmayı amaçlamaktadır. Mekanizma boyutları için Arı Algoritması ve Genetik Algoritma kullanılmıştır. Optimizasyon için gerekli sınırlar ve amaç fonksiyonu belirlenmiş, birçok deneme sonrası Arı Algoritması ve Genetik Algoritma için ayrı ayrı mekanizma boyutları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve Arı Algoritmasının referans ani dönme merkezi eğrisine daha iyi yaklaşan mekanizma boyutları verdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Diz Protezleri, Çok Merkezli Diz Mekanizması, Dört Çubuk Mekanizması, Alt-Ekstremite Protezi, Gönüllü Kontrol, Ani Dönme Merkezi

### **1. INTRODUCTION**

Walking and running are one of the daily activities for humans. In transfemoral amputees, on the other hand, the best way to gain walking ability is to use knee prostheses. In these prostheses, the most important factor affecting walking and performance is the knee mechanism (El-Sayed et al., 2014). Knee prostheses are generally divided into passive and active knee prostheses with respect to the power requirement. Active knee prostheses have a motor or actuator unlike passive knee prostheses which increases the weight and volume of the knee prosthesis and shortens the operating time of the prosthesis due to the battery capacity. Passive knee prostheses, on the other hand, are more used in the commercial field since there is no need for batteries (Fu et al., 2016). Knee prostheses are further divided into two as single axis and polycentric prosthetic knee mechanisms with respect to their functions (Radcliffe 1994). Although single axis (monocentric) knee mechanisms are cheaper, simpler, and smaller, their control is limited since they have fixed axes of rotation. This causes an unstable and unnatural gait. While polycentric knee mechanisms are expensive compared to single axis knee mechanisms, they are easy to control since they have the curve of the instantaneous center of rotation (ICR) that provide stability in the stance and swing phases of the prosthesis (Chauhan and Bhaduri 2011). The four-bar mechanism, which is a polycentric knee mechanism, is widely used in knee prostheses due to its simplicity. To assure stability, polycentric knee mechanisms must meet the following factors: length and strength of the remaining limb, the fitting of the socket, position of the hip joint relative to the knee and ankle joints of the prosthesis, and functional characteristics of the knee and foot-ankle mechanisms included in the prosthesis (Radcliffe 2003).

There are many studies on four-bar mechanisms in the literature. Since the meta-heuristic optimization techniques that have developed and increased in recent years, optimization studies of

the ICR curve and path synthesis of the four-bar mechanism have increased in number. Some of these studies are given below.

Anand T.S. and Sujatha S. stated that they made the dimension optimization of the four-bar mechanism according to six different parameters using multi-objective Genetic Algorithm and compared it with the commercially used four-bar knee mechanisms in terms of toe tolerance, maximum knee extension and the stability of the knee prosthesis. As a result of the comparison, they indicated that the four-bar mechanism they designed was the best among others according to the parameters they chose (Anand and Sujatha, 2017). Roy et al. obtained the desired path of the four-bar mechanism by optimizing the dimensions of the mechanism with the Genetic Algorithm. They wrote the objective function as the sum of the squares of the difference of the path coordinates of the desired and obtained mechanism. In addition, they compared the paths of the four-bar mechanisms obtained before and after optimization (Roy et al., 2008). Soriano et al. using videogrammetry, put sensors on the ankle, knee, and hip of a few healthy individuals to examine their gait patterns. As a result of their examination, they deduced the curve of the ICR of the knee. They used linear regression method on these curves and applied Genetic Algorithm for dimension optimization of four-bar knee mechanism. They stated that the objective function was determined for voluntary control four-bar knee mechanism and the stability of the knee prosthesis. As a constraint, they determined a control area for voluntary control four-bar knee mechanism. Then, they compared the obtained four-bar knee mechanism with four different four-bar knee mechanism used in the commercial field (Soriano et al., 2020). Pfeifer et al., performed an optimization study for the torque profile of four different mechanisms used in active knee prostheses. They wrote that they chose the objective function as the sum of the squares of the difference between the desired torque profile and the obtained torque profile, through the flexion angle of the knee. As a result of their study, they indicated that the single axis knee mechanism gives the highest torque value, while the four-bar mechanism gives an almost uniform torque profile throughout the movement of the knee (Pfeifer et al., 2012). Şen M. A. made a dimension optimization study of the four-bar mechanism using Whale Optimization Algorithm (WOA) for the path synthesis of mechanism. He chose the reference curve as a circumscribed trajectory with a certain portion as a line segment. He expressed the objective function by mean value of the absolute error values along the x-axis between the reference trajectory and the actual trajectory. In addition, the results obtained after the optimization were compared with the results before the optimization (Şen 2021). Eqra et al. performed an optimization study for path synthesis of four-bar mechanisms using four different algorithms. They reported that the best results were obtained with AIW-PSO. They determined the objective function as the square of the sum of the difference between the reference path coordinates and the obtained path coordinates. They arranged the objective function for both open and crossed four-bar mechanism (Eqra et al., 2018). Muñoz-César et al. used the Taboo Search Algorithm and made dimension optimization of the voluntary control four-bar knee mechanism. They defined the objective function as the quadratic error of the difference between the reference ICR curve and the calculated ICR curve. In addition, they manufactured and applied the optimized knee prosthesis for a user whose left leg was amputated (Muñoz-César et al., 2013). Marisami P. and Venkatachalam R. synthesized a polycentric knee mechanism to improve the toe-clearance at mid-swing with optimizing dimensions of the mechanism by Evolutionary Algorithm. They used both the fixed and moving trajectories of the four-bar mechanism as parameters; they also wrote that, by creating a radar diagram over some parameters with commercial knee prostheses, the mechanism they obtained scored, in overall higher than the most available mechanisms (Marisami and Venkatachalam, 2022). Poliakov et al., obtained an appropriate Pareto solution set by means of

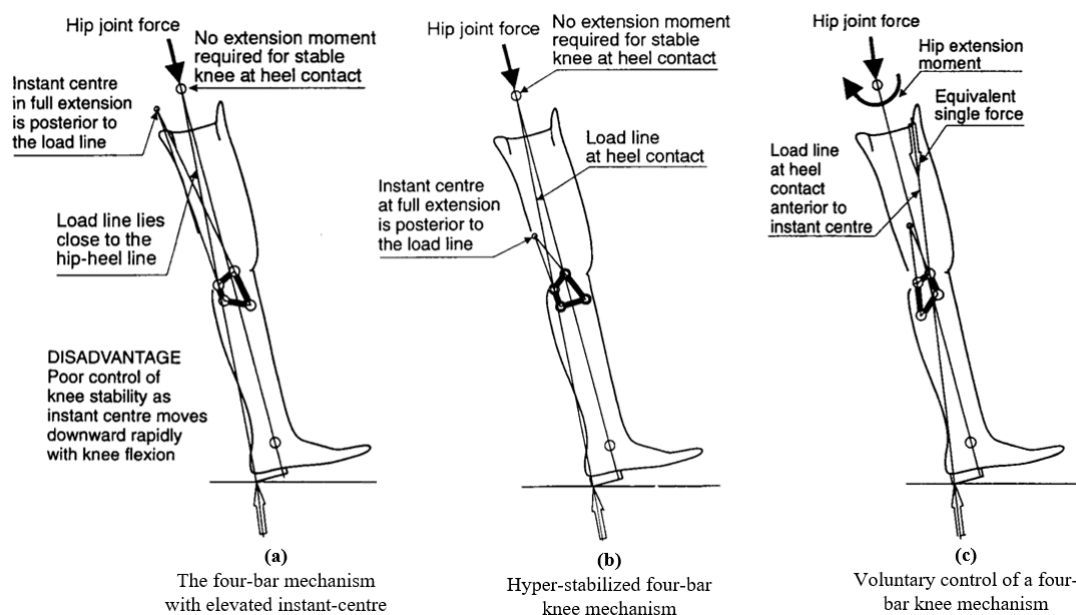
the PSI Algorithm for the dimensions of four-bar knee mechanism. A multi-criteria dimension optimization study was performed for the reference ICR curve and the reference mechanism path. However, the four-bar mechanism they obtained as a result of the optimization is not fully suitable for use in knee prostheses unless the exact desired parameters are given (Poliakov et al., 2013). Different from the others, Yonghong et al. studied the six-bar mechanism for knee prosthesis and stated that they obtained the values of the knee and ankle angles of thirty different healthy individuals in the gait analysis by using motion capture technology. They also indicated that they chose the six-bar mechanism to better mimic the movement of the human knee in the configuration of the knee prosthesis. They used Genetic Algorithm for the dimension optimization of the six-bar mechanism and formed the objective function by the least square method using the values obtained from the gait analysis and the ICR curve of the ideal human knee (Zhang et al., 2021).

In the studies given above, optimization works of the four-bar mechanisms used and not used in knee prostheses were carried out by using different objective functions and different optimization techniques. The other studies that implemented the optimization techniques to their work in literature did not perform any comparison with other algorithms. This may lead to think if the results from the optimizations are the best or not. However, in this study we used the results of the most used algorithm in this area which is The Genetic Algorithm and compared it with The Bees Algorithm which is successful in local search. The suitability of The Bees Algorithm for use in this area has been mentioned by optimizing the dimensions of four-bar knee mechanisms according to the ICR curve of the mechanisms.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Polycentric Knee Mechanisms

The four-bar knee mechanism, which is one of the polycentric knee mechanisms is divided into three as follows (Al-Maliky and Chiad, 2021): the hyper-stabilized four bar knee mechanism, voluntary control four bar mechanism, and the four-bar mechanism with elevated instantaneous center. A schematic of these three types of four-bar mechanisms is given in Figure 1.



**Figure 1.** Four-bar mechanisms used in knee prosthesis (Radcliffe 1994).

While the four-bar mechanism with elevated instantaneous center provides stability at the heel contact, the hyper-stabilized four bar knee mechanism functions as fixed knee mechanism to ensure durability for less active amputees. Compared to the other two, for the voluntary control four-bar mechanism, amputee applies hip moment. However, this four-rod mechanism gives freedom to the amputee since the ICR can be controlled by the user both at heel contact and at push-off. This mechanism used in knee prosthesis is preferred by aggressively active amputees (Andrysek et al., 2011). In the commercial and academic fields, the voluntary control four-bar knee mechanism is used more than others.

The voluntary control four-bar knee mechanism has control area that allows the amputee to control the stability and position of the prosthetic knee in stance phase stages (Sancisi et al., 2009).

One of the voluntary control four-bar knee mechanism that is used in commercial area is Otto Bock 3R20 knee prosthesis. The Otto Bock 3R20 knee prosthesis is designed to provide stability and mobility for individuals with lower limb amputations. Here are some specifications of the Otto Bock 3R20 knee prosthesis:

- Weight: The weight of the 3R20 knee prosthesis for the stainless steel material is approximately 690 grams.
- Mechanical Design: It features a four-bar linkage mechanism that allows for controlled movement and stability during various activities.
- Flexion/Extension Range: The knee prosthesis offers a flexion range of approximately 110 degrees, allowing for natural movement during walking, sitting, and other activities.
- Stance Control: The 3R20 knee prosthesis incorporates a stance control feature that provides stability and control during the stance phase of walking.
- Compatibility: It is compatible with various prosthetic components and can be customized to fit individual user needs and preferences (Otto Bock 3R20/3R36 User Manuel, n.d.).

The Otto Bock 3R20 knee prosthesis is given in Figure 2.



**Figure 2.** Otto Bock 3r20 knee prosthesis (Otto Bock 3R20, n.d.).

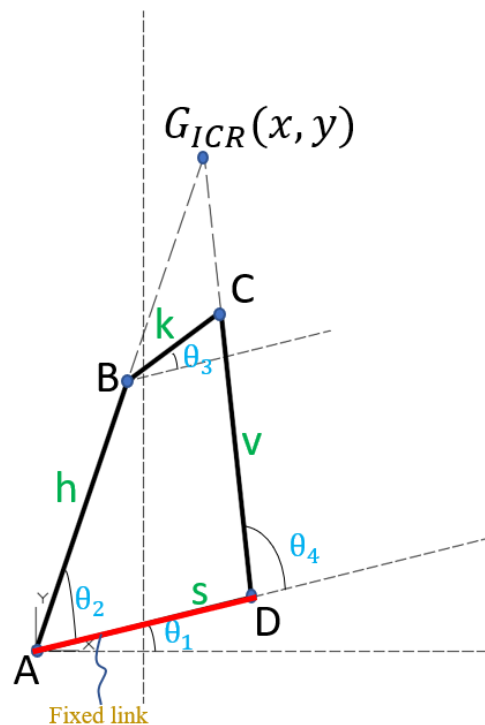
In this study, using the ICR curve of the Otto Bock 3R20 knee prosthesis as reference, which is used in the commercial area and a voluntary control four-bar knee mechanism, mechanism dimensions suitable for the curve were obtained with two different algorithms. The reason for choosing this particular knee prosthesis is twofold: it is widely used in the commercial field, and it has also been taken as the reference ICR curve in (Al-Maliky and Chiad, 2021). In this study, different

optimization methods were employed with the four-bar mechanism to successfully achieve the same curve.

## 2.2. Displacement Analysis of the Mechanism

The configuration of the four-bar mechanism used in knee prostheses is given in Figure 3. The dimensions of four bar links are as follows:  $s$ ,  $h$ ,  $k$ , and  $v$ , where “ $s$ ” is the link 1, “ $h$ ” is the link 2, “ $k$ ” is the link 3 and “ $v$ ” is link 4.

Centroid points of the joints of four-bar mechanism are as follows: A, B, C and D. The upper link BC is connected to socket part. On the other hand, the shank is connected to the lower link AD. The angles  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  and  $\theta_4$  are the rotation angles of the links  $s$ ,  $h$ ,  $k$ , and  $v$  respectively. One of the rotating joint points, A, is selected as  $[0,0]$  in Cartesian coordinates. ICR coordinates defined as  $G_{ICR}$ . The AD link of the mechanism was taken as fixed. The relationship between  $\theta_E$ , the knee flexion angle and  $\theta_3$ , the rotation angle of link BC can be written as  $\theta_3 = \theta_E + \beta$ , where  $\beta$  is the starting angle of the knee when  $\theta_E = 0$ .



**Figure 3.** Configuration of four-bar mechanism.

During the movement, the BC link rotates at an angle of  $\theta_3$  and determined as the driving angle. The following equations are written according to the method proposed by Hobson and Torfason for the coordinates of the ICR of four-bar mechanisms (Hobson ve Torfason, 1974).

$$h \cos(\theta_2) + k \cos(\theta_3) = v \cos(\theta_4) + s \quad (1)$$

$$h \sin(\theta_2) + k \sin(\theta_3) = v \sin(\theta_4) \quad (2)$$

By examining the configuration of the mechanism, the relationship between the rotation angles of the second and third links is written from equations (1) and (2):

$$E \sin(\theta_2) + F \cos(\theta_2) = P \quad (3)$$

Here;

$$E = \sin(\theta_3) \quad (4)$$

$$F = \cos(\theta_3) - \frac{s}{k} \quad (5)$$

$$P = -\frac{s^2+h^2+k^2-v^2}{2hk} + \frac{s}{h} \cos(\theta_3) \quad (6)$$

By making an abbreviation,  $\theta_2$ , which is the angle of rotation of the link h, and as a function of  $\theta_2$ ,  $\theta_4$  is written as follows:

$$V = \sqrt{E^2 + F^2 - P^2} \quad (7)$$

$$\theta_2 = 2 \tan^{-1} \left( \frac{E \pm V}{F + P} \right) \quad (8)$$

$$\theta_4 = \sin^{-1} \left( \frac{h \sin(\theta_2) + k \sin(\theta_3)}{v} \right) \quad (9)$$

$$\theta_4 = \cos^{-1} \left( \frac{h \cos(\theta_2) + k \cos(\theta_3) - s}{v} \right) \quad (10)$$

There are two different solutions of  $\theta_2$  from equation (8). Both solutions give different types of four-bar mechanism. By choosing one of these values, the angle  $\theta_4$  is found.

By using the equations given above, the coordinates of  $G_{ICR}$ , which is the coordinates of ICR, can be written as follows:

$$G_x = \left[ \frac{\tan(\theta_1 + \theta_4) \cos(\theta_1) - \sin(\theta_1)}{\tan(\theta_1 + \theta_4) - \tan(\theta_1 + \theta_2)} \right] s \quad (11)$$

$$G_y = \left[ \frac{\tan(\theta_1 + \theta_2) [\tan(\theta_1 + \theta_4) \cos(\theta_1) - \sin(\theta_1)]}{\tan(\theta_1 + \theta_4) - \tan(\theta_1 + \theta_2)} \right] s \quad (12)$$

In this study,  $\theta_1 = 5^\circ$  was taken and the equations were solved in the MATLAB program.

### 2.3. Dimension Optimization of Knee Mechanism

In this section, dimension optimization of the four-bar knee mechanism has been studied by using Genetic Algorithm and The Bees Algorithm.

The constraints for the desired results are given below:

- The four-bar mechanisms used in the knee prostheses must act as double rocker. According to Grashof's Law, if the mechanism is a double rocker, the relationship between link

dimensions can be defined as  $l_{min} + l_{max} < l' + l''$ . Here,  $l_{min}$  represents link “k” of the mechanism whose configuration is given in Figure 2.

- If the ICR of the mechanism is desired to remain high up to  $\theta_E = 15^\circ - 20^\circ$ , the constraint  $h \leq v$  can be written (Chauhan ve Bhaduri, 2011).
- Considering the aesthetics of the mechanism, the limitations determined for the mechanism dimensions are given in Table 1 (Anand ve Sujatha, 2017).

**Table 1.** Dimension limits of the four-bar knee mechanism.

	s	h	k	v
Minimum	15	30	11	35
Maximum	25	40	14	50

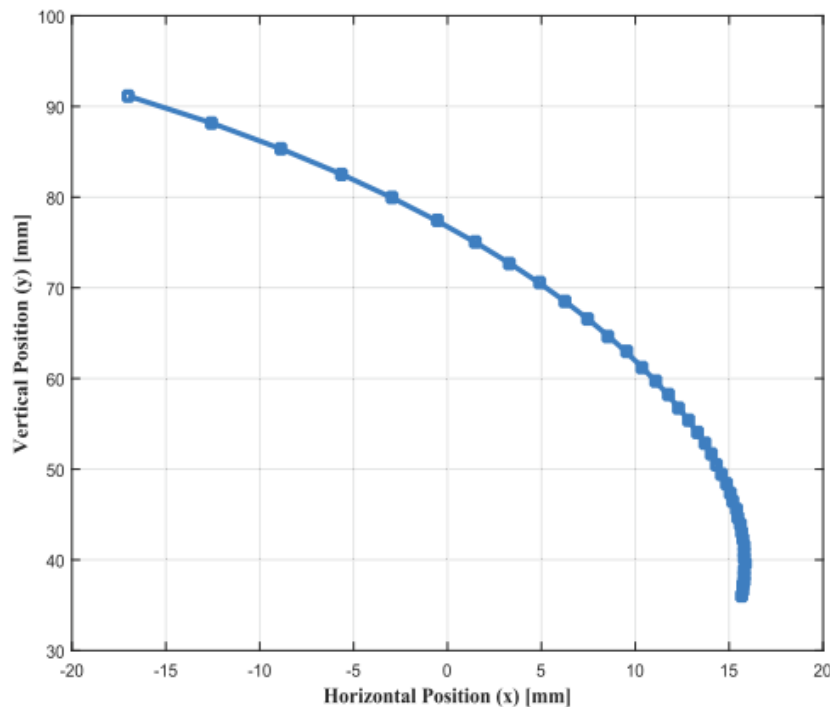
The reason for choosing this dimension limits for the optimization work, is to find a smaller and lighter four-bar knee mechanism than Otto Bock 3R20 knee prosthesis that can approximate the reference ICR curve as much as possible. This is why the dimension limits of the shortest link “k” are chosen this close.

According to the limitations given in Table 1, the objective function is given in equation (13).

$$AF = \sum_1^n [(X_{RG_i} - X_{G_i})^2 + (Y_{RG_i} - Y_{G_i})^2] + \sum_1^n (f_{H_i}) \quad (13)$$

Here,  $n$  is chosen to be the flexion angle values of the knee at the stance position. The objective function was determined as the sum of the square of differences between “x” and “y” coordinates of reference ICR and obtained ICR curve. That is, the least square method is used. Here,  $f_{H_i}$  represents the penalty function for Grashof's Law for double rocker.

In this study, the ICR curve of the Otto Bock 3R20 knee prosthesis was selected as a reference. The reference ICR curve is given in Figure 4.

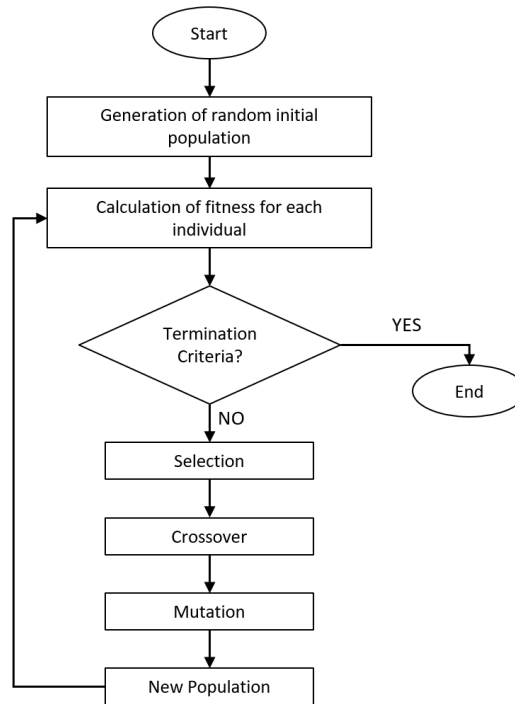


**Figure 4.** ICR curve of Otto Bock 3R20 at stance phase (Al-Maliky ve Chiad, 2021).

### 2.3.1. Dimension optimization with genetic algorithm

In this sub-section, the process of the Genetic Algorithm (GA) and the application of the determined objective function according to the limits are briefly explained.

In Figure 5, the flowchart of the Genetic Algorithm is given. As shown in below, the process is repeated until the iteration is over or the appropriate solution is found. Although Genetic Algorithm may not find the accurate answer as it works according to the rules of probability, it is used to solve problems that are difficult or impossible to solve with traditional methods (Holland 1992; İlgen et al., 2022).



**Figure 5.** The flowchart of Genetic Algorithm.

### 2.3.2. Dimension optimization with The Bees Algorithm

Proposed by Pham et al., The Bees Algorithm is a population-based search algorithm that imitates the resource-seeking behavior of honeybees. An example of such interactive behavior is that honeybees share information about the quality of the source (nectar, water, etc.) they find by performing bee dance. Bees that find a high-quality source through this dance, share their direction, distance, and nectar amount information about this source with other bees. With the help of this mechanism, the colony can be directed to sites with high quality resources (Pham et al., 2005, 2006). Pham and Kalyoncu made a study to control a flexible link robot manipulator using PID and The Bees Algorithm based Fuzzy Logic controllers. Using The Bees Algorithm, this work is the first experimental and theoretical study for controller optimization (Pham et al., 2008; Pham ve Kalyoncu, 2009). For the evaluation of the suitability of The Bees Algorithm in controller optimization area, Şen and Kalyoncu designed PID and LQR controller with The Bees Algorithm for the optimization of inverted pendulum system (Şen et al., 2016; Şen and Kalyoncu, 2015). As a result of these studies, it is observed that The Bees Algorithm gives appropriate results in the designing of the controller parameters and compared to the traditional methods the position control of the system is improved. Eser et al. carried out optimization studies to reduce the deviations in the suspension system to achieve better driving ability and comfort of the quarter vehicle suspension system in the road map. They

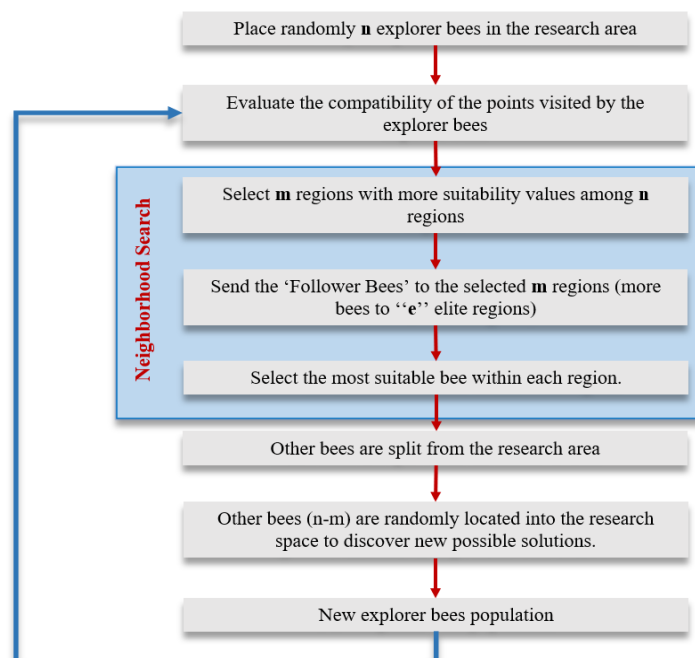


compared the deviations using The Bees Algorithm and Particle Swarm Optimization and stated that The Bees Algorithm gave more successful results (Eser et al., 2021).

There are many parameters in the working principle of the Bee Algorithm. These are:

- $n$ : The number of scout bees.
- $m$ : Number of sites selected from " $n$ " points visited.
- $e$ : The number of elite sites in the selected  $m$  sites.
- $nep$ : The number of bees sent to the best  $e$  site.
- $nsp$ : The number of bees sent to the remaining ( $m-e$ ) site.
- $ngh$ : size of the site.
- $iter$ : stop criteria number or iterations (Eser et al., 2021; Pham et al., 2006).

The flowchart of The Bees Algorithm is given in Figure 6.



**Figure 6.** The flowchart of The Bees Algorithm.

The steps of flowchart in detail are given below:

- 1) Create a randomly generated population in space, adhering to constraints.
- 2) Calculate the error of the population and sort from smallest to largest.
- 3) Continue the loop until the stop condition is met.
- 4) Select the best populated areas for neighborhood search.
- 5) Send bees to the neighborhoods of the best populated regions and calculate the error of each bee.
- 6) Sort the error of each neighborhood group from smallest to largest.
- 7) Randomly distribute the remaining bees back to space considering the constraints and calculate their errors.
- 8) Start the loop again (go to step 3)

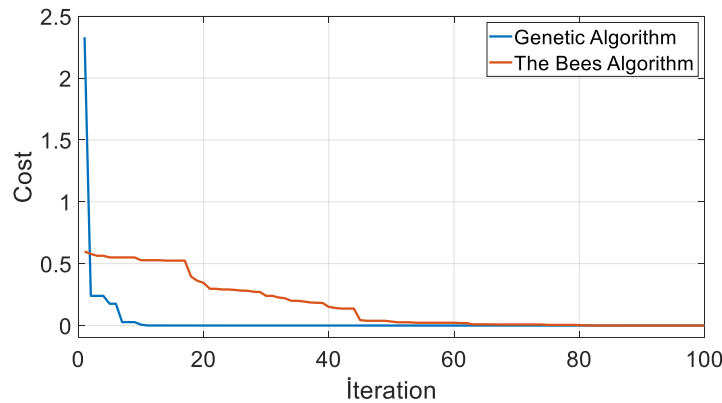
**Table 2.** Parameters of The Bees Algorithm.

n	m	e	nep	nsp	ngb	itr
80	12	5	2	4	0.01	105

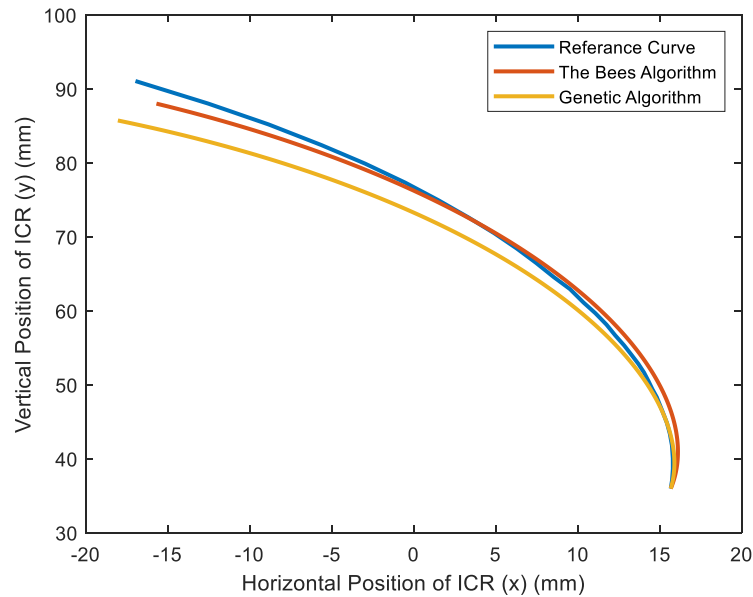
### 3. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, the dimension optimization of the four-bar knee mechanism is made according to the limitations, objective function and algorithm parameters given above. Reference curve is taken as the ICR curve of the Otto Bock 3R20 knee prosthesis. With MATLAB software, Genetic Algorithm which is widely used in the literature and The Bees Algorithm are compared for the dimension optimization of the four-bar knee mechanisms. The other studies that implemented the optimization techniques to their work in literature did not perform any comparison with other algorithms. This may lead to think if the results from the optimizations are the best or not. However, in this study we used the results of the most used algorithm in this area which is The Genetic Algorithm and compared it with The Bees Algorithm which is successful in local search. The aim in this study is to evaluate the suitability of The Bees Algorithm in knee mechanisms. The initial angle of the first link  $\theta_1 = 5^\circ$  was chosen. The limitations are given in Table 1.

In Figure 7, using both algorithms, the convergence graph of the dimension optimization study of the four-bar knee mechanism is given.

**Figure 7.** Convergence graph of the optimization study with The Bees Algorithm and Genetic Algorithm.

In Figure 8, the reference ICR curve compared with the ICR curves obtained from optimization with Genetic Algorithm and The Bees Algorithm. In Table 3, the dimensions obtained after optimization using Genetic Algorithm and The Bees Algorithm are given.



**Figure 8.** Comparison of ICR curves.

**Table 3.** Mechanism dimensions obtained using Genetic Algorithm and The Bees Algorithm.

	<b>s</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>v</b>
Genetic Algorithm	20.7465 mm	34.0135 mm	12.0544 mm	41.8178 mm
The Bees Algorithm	19.1815 mm	34.9417 mm	11.3698 mm	41.8924 mm

In the convergence graph seen in Figure 7, the Genetic Algorithm converged to the result in less iterations than The Bees Algorithm. However, in the comparison given in Figure 8, optimization results using The Bees Algorithm are closer to the reference curve than optimization results using Genetic Algorithm. The reason for this is that The Bees Algorithm makes a more sensitive search in smaller areas and converges to the optimum values higher.

#### 4. CONCLUSION

In this study, determining the reference as ICR curve of Otto Bock 3R20 knee mechanism at stance phase, an optimization comparison was done for the mechanism dimensions by using The Bees Algorithm and Genetic Algorithm. The constraints required for the aesthetic aspects of the mechanism and for the use of the mechanism in knee prostheses were determined, penalty functions were written, and the necessary objective function was defined according to these parameters. Parameters of The Bees Algorithm are defined. After many optimizations attempts with The Bees Algorithm and Genetic Algorithm, the minimum and maximum limits of the mechanism dimensions were updated, and appropriate results have obtained in less iterations. As a result of the comparison of both algorithms, it was seen that The Bees Algorithm reached the appropriate result at higher iterations than Genetic Algorithm. However, more accurate mechanism dimensions were obtained with The Bees Algorithm in approaching the reference curve.

In this study, it was seen that The Bees Algorithm gave a suitable result for the four-bar mechanisms used in knee prostheses. As a result, it can be said that The Bees Algorithm can be applied to four-bar knee mechanisms.

## 5. CONFLICT OF INTEREST

Authors approve that to the best of their knowledge, there is not any conflict of interest or common interest with an institution/organization or a person that may affect the review process of the paper.

## 6. AUTHOR CONTRIBUTION

Mert Eren AYĞAHOĞLU performed the synthesis of the four-bar knee mechanism and wrote the paper. Mert Eren AYĞAHOĞLU, Abdullah ÇAKAN and Mehmet Sefa GÜMÜŞ contributed to the optimization of the knee prosthesis, process of the research, research management and interpretation of the results. Mete KALYONCU contributed to determine the concept of the research and research management and final approval of the research.

## 7. REFERENCES

- Al-Maliky F. T., Chiad J. S. Study and evaluation of four bar polycentric knee used in the prosthetic limb for transfemoral amputee during the gait cycle. *Materials Today: Proceedings*, 42, 2706–2712, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.709>
- Anand T. S., Sujatha S. A method for performance comparison of polycentric knees and its application to the design of a knee for developing countries. *Prosthetics and Orthotics International*, 41(4), 402–411, 2017. <https://doi.org/10.1177/0309364616652017>
- Andrysek J., Klejman S., Torres-Moreno R., Heim W., Steinnagel B., Glasford S. Mobility function of a prosthetic knee joint with an automatic stance phase lock. *Prosthetics and Orthotics International*, 35(2), 163–170, 2011. <https://doi.org/10.1177/0309364611408495>
- Chauhan S. S., Bhaduri S. C. Evaluation of the Polycentric above Knee Prosthesis. 15th National Conference on Machines and Mechanisms, 1–10, 2011.
- El-Sayed A. M., Hamzaid N. A., Abu Osman N. A. Technology efficacy in active prosthetic knees for transfemoral amputees: A quantitative evaluation. In *Scientific World Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/297431>
- Eqra N., Abiri A. H., Vatankhah R. Optimal synthesis of a four-bar linkage for path generation using adaptive PSO. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(9), 2018. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1392-1>
- Eser O., Çakan A., Kalyoncu M., Botsalı F. Arı Algoritması (AA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Kullanarak Çeyrek Araç Modeli Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 621–632, 2021. <https://doi.org/10.36306/konjes.881062>
- Fu, H., Zhang, X., Wang, X., Yang, R., Li, J., Wang, L., Zhang, N., Li, G., Liu, T., Fan, B., Inoue Y. A novel prosthetic knee joint with a parallel spring and damping mechanism. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13(4), 2016. <https://doi.org/10.1177/1729881416658174>
- Hobson D. A., Torfason L. E. Optimization of Four-Bar Knee Mechanism-a Computerized Approach. *Journal of Biomechanics*, 7(4), 371–376, 1974.
- Holland J. H. Genetic Algorithms. 267(1), 66–73, 1992. <https://doi.org/10.2307/24939139>

- İlgen S., Durdu A., Gülbahçe E., Çakan A., Kalyoncu M. The Bees Algorithm Approach to Determining SMC Controller Parameters for the Position Control of a SCARA Robot Manipulator. *European Journal of Science and Technology*. 2022. <https://doi.org/10.31590/ejosat.883266>
- Marisami P., Venkatachalam R. Towards optimal toe-clearance in synthesizing polycentric prosthetic knee mechanism. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 25(6), 656–667, 2022. <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1972291>
- Muñoz-César J. J., Hernández-Gómez L. H., López-Suárez O. I., Urriolagoitia-Sosa G., Beltrán-Fernández J. A., Urriolagoitia-Calderón G., Pava-Chipol N. D., Quintero-Gómez I. J. Optimization of the Design of a Four Bar Mechanism for a Lower Limb Prosthesis Using the Taboo Search Algorithm. In *Advanced Structured Materials* (Vol. 40, pp. 107–125), 2013. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-00479-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00479-2_9)
- Otto Bock 3R20, 2023. Available online: <https://www.protesicave.com/Prótesis-Con-3r20> (accessed on 13 May 2023)
- Otto Bock 3R20/3R36 User Manuel. (n.d.), 2023. Otto Bock.
- Pfeifer S., Riener R., Vallery H. An Actuated Transfemoral Prosthesis with Optimized Polycentric Knee Joint. *The Fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, 1807–1812, 2012.
- Pham D. T., Kalyoncu M. Optimisation of a fuzzy logic controller for a flexible single-link robot arm using the bees algorithm. *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 475–480, 2009. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2009.5195850>
- Pham D. T., Ghanbarzadeh A., Koc E., Otri S., Rahim S., Zaidi M. *The Bees Algorithm*, 2005.
- Pham D. T., Ghanbarzadeh A., Koç E., Otri S., Rahim S., Zaidi M. The Bees Algorithm- A Novel Tool for Complex Optimisation Problems. *Intelligent Production Machines and Systems*, 454–459, 2006.
- Pham D. T., Kalyoncu M., Koç E., Tinkır M. Hierarchical PID Controller Design for a Flexible Link Robot Manipulator Using the Bees Algorithm. *Proceedings of 6th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems*, 2008. <https://www.researchgate.net/publication/280921975>
- Poliakov O. M., Lazarev V. B., Chepenyuk O. O. Transfemoral Prosthesis with Polycentric Knee Mechanism: Design, Kinematics, Dynamics and Control Strategy. In *Journal of Rehabilitation Robotics* (Issue 1), 2013.
- Radcliffe C. W. Four-bar linkage prosthetic knee mechanisms: kinematics, alignment and prescription criteria. In *Prosthetics and Orthotics International* 18, 1994.
- Radcliffe C. W., Professor D. M. Biomechanics of Knee Stability Control with Four-Bar Prosthetic Knees. *ISPO Australia Annual Meeting*, 2003.
- Roy L., Sen A., Chetia R. P., Borah M. J. Analysis and Synthesis of Four bar Mechanism. *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 3(2), 171–186, 2008. <http://www.ripublication.com/ijtam.htm>
- Sancisi N., Caminati R., Parenti-Castelli V. Optimal Four-Bar Linkage for the Stability and the Motion of the Human Knee Prostheses. 2009.
- Soriano J. F., Rodríguez J. E., Valencia L. A. Performance comparison and design of an optimal polycentric knee mechanism. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(5), 2020. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02313-6>

- şen M. A. Balina Optimizasyon Algoritması Kullanılarak Dört Çubuk Mekanizmasının Optimum Yörünge Sentezi. 20. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, 276–282, 2021. <https://www.researchgate.net/publication/366589931>
- şen M. A., Kalyoncu M. İki Tekerlekli Kendi Kendini Dengeleyen Robotun Yörünge Takibi için Arı Algoritması kullanarak LQR Kontrolcü Tasarımı. Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu, 1–7, 2015. <https://www.researchgate.net/publication/280932255>
- şen M. A., Bilgiç H. H., Kalyoncu M. Determination of LQR Controller Parameters for Stabilization and Position Control of Double Inverted Pendulum Using The Bees Algorithm. Mühendis ve Makina, 57(679), 53–62, 2016.
- Zhang Y., Wang E., Wang M., Liu S., Ge W. Design and Experimental Research of Knee Joint Prosthesis Based on Gait Acquisition Technology. Biomimetics, 6(28), 1–15, 2021. <https://doi.org/10.3390/biomimetics>

**Araştırma Makalesi / Research Article**

**AA6061 Serisi Alüminyum Plakalarına Yapılan MIG ve TIG Kaynak Tamirlerinin Tahribatlı ve Tahribatsız Testlerle İncelenmesi**

Mustafa ARSLAN<sup>1\*</sup>, Nil TOPLAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Türkiye Raylı Sistem Araçları Sanayii A.Ş., Sakarya, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0106-7656>, mustafa.arslan@turasas.gov.tr

<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4130-0002>, toplan@sakarya.edu.tr

**Geliş/ Received:** 17.04.2023;

**Kabul / Accepted:** 14.06.2023

**ÖZET:** Mevcut çalışma AA6061 plakaların MIG kaynak yöntemiyle birleştirilmesinin ardından MIG ve TIG kaynak yöntemleri kullanılarak üçer defa tamir işlemini kapsamaktadır. Kaynaklı numunelere tahribatlı ve tahribatsız testler uygulanmıştır. Gözle muayene ve sıvı penetrant testi sonuçlarına göre TIG kaynağı MIG kaynağına göre daha düzgün bir kaynak yüzeyi sergilemiş ve radyografik muayene sonuçlarında hataya rastlanmamıştır. Makroyapı incelemelerinde tamirat işleminin gözenek oluşumuna gözle görülür bir etkisinin olmadığı, mikroyapı incelemelerinde tamirat sayısı arttıkça ısı girdisine bağlı olarak ITAB bölgesinde tanelerin irileştiği belirlenmiştir. Sertlik değerleri ana metalden kaynak bölgesine doğru gidildikçe azalmış, çekme deneyi sonuçlarında ise MIG kaynağının TIG kaynağına göre daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğu ve tamirat sayısı arttıkça mukavemet değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. SEM-EDS sonuçlarına göre tamirat sayısı arttıkça mukavemet arttırıcı görevi olan Mg'nin oranının azaldığı belirlenmiştir. XRD sonuçlarına göre alüminyum pikleri ile birlikte, Mg<sub>2</sub>Si'nin düşük şiddette pik verdiği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** AA6061, ITAB, MIG kaynağı, Tahribatlı test, Tahribatsız test, TIG kaynağı.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: mustafa.arslan@turasas.gov.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Arslan, M., Toplan, N. (2023). AA6061 Serisi Alüminyum Plakalarına Yapılan MIG ve TIG Kaynak Tamirlerinin Tahribatlı ve Tahribatsız Testlerle İncelenmesi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 333-354.

## Investigation of MIG and TIG Welding Repairs on AA6061 Series Aluminum Plates by Destructive and Non-Destructive Tests

**ABSTRACT:** The study includes the joining of AA6061 plates with MIG welding method and then repairing three times using MIG and TIG welding methods. Destructive and non-destructive tests were applied to the welded samples. According to the results of visual inspection and liquid penetrant test, TIG welding exhibited a smoother weld surface than MIG welding, and no defect were found in the radiographic inspection results. It was determined that the repair process did not have a visible effect on the pore formation in the macrostructure examinations, and the grains in the HAZ region became coarser due to the heat input as the number of repairs increased in the microstructural examinations. The hardness values decreased from the base metal to the welding zone, and in the tensile test results, it was determined that MIG welding had higher strength values than TIG welding and the strength values decreased as the number of repairs increased. According to the SEM-EDS results, it was determined that as the number of repairs increased, the ratio of Mg, which has the task of increasing the strength, decreased. According to the XRD results, it was observed that Mg<sub>2</sub>Si gave low intensity peaks together with the aluminum peaks.

**Keywords:** AA6061, Destructive test, Non-destructive test, HAZ, MIG welding, TIG welding.

### 1. GİRİŞ

Alüminyum alaşımları, havacılık, uzay araçları, yapısal ve askeri alanda; yüksek elastik modül, yüksek spesifik mukavemet, iyi kırılma tokluğu ve mükemmel korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı kullanılmaktadır. AA6061 magnezyum ve silisyum gibi ana alaşım elementlerini içeren çökeltme ile sertleştirilmiş alüminyum alaşımları olup çökeltme sertleşmesi ile mukavemeti artırılabilen, ısı işlem görebilen ve ayrıca kaynakta ısı girdisi sırasında faz dönüşümü meydana gelen alaşımlardır. 1935 yılında geliştirilmiş ve Alloy 61S olarak adlandırılmıştır (Kumar ve ark., 2021). Alüminyumun ekonomikliği ve kullanım alanlarının çok geniş olması, uygun mekanik özelliklerinin yanı sıra, düşük yoğunluğu, kolay işlenebilir ve şekillendirilebilirliği, geri dönüşümünün mümkün olması, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği gibi özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır (Prakash ve ark., 2012).

Alüminyum kaynağı ile ilgili Malin tarafından yapılan bir çalışmada, 6061-T6 parçası 4043 dolgu malzemesi ile MIG kaynağı kullanılarak kaynak yapılmıştır. Mikrosertlik değeri ölçümleri, 100 gram yük ile bir Knoop mikrosertlik test cihazı kullanılarak, kaynağa paralel olarak ve kaynak merkez hattından 0.125 inç'lik artışlarla alınmıştır. Çalışma, ısıdan etkilenen bölgedeki (ITAB) sertlik değerlerinin ana malzemenin yaklaşık %70'i olduğunu göstermiştir. Ana malzemenin kaynak öncesi akma dayanımı 44.35 ksi iken kaynak sonrası ortalama değeri 30 ksi olarak ölçülmüştür. Çalışmada test edilen 12 numuneden 7'si füzyon hattıyla ITAB arasındaki 0,01-0,4 inç arasında değişen bölgelerden kopmuştur (Malin, 1995). Ambriz ve arkadaşları gaz metal ark kaynağının 6061-T6 üzerindeki etkisini incelediği çalışmada, ısı girdisi ne kadar yüksek olursa, ITAB'ın mekanik özelliklerinin o kadar düşük olduğunu ortaya koymuşlardır. Kaynak çatlamasının nedeninin, alüminyum alaşımının çok yüksek termal genleşme miktarının yanı sıra geniş katılma sıcaklık aralığından kaynaklandığını ortaya koymuşlardır (Ambriz ve ark., 2009). Hirose ve arkadaşları 6061-T6 için lazer kaynağının ITAB üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Kaynak işlemi sırasında daha fazla ısı girdisinin, ısıdan etkilenen bölgede sertlik düşüşüne ve kaynak esnasında yüksek ısı girdisinin dalgalanması ITAB'da çökeltilerinin çözünmesine neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada 1 mm kalınlığında bir 6061-T6 parçası üzerinde TIG kaynağı ve lazer



kaynağı uygulanmıştır. Lazer kaynağı için ısıdan etkilenen bölgenin TIG kaynağınıninkinin yaklaşık 1/7 ila 1/4'ü kadar azaldığını gözlemlenmiştir. Sadece ITAB bölgesi küçülmekle kalmamış, aynı zamanda suni yaşlandırma ile sertlik neredeyse tamamen geri kazanılmıştır (Hirose ve ark., 1999). Withers bir malzemenin yüzeyindeki ısı girdisinin, o metalde oluşan kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisini incelemiş ve ısı girdisi azaldığında yüzeydeki alanın çok daha hızlı büzüldüğü ve malzemenin oda sıcaklığına daha hızlı soğuduğu sonucuna varmıştır. Soğuma esnasında dış yüzey büzülme eğiliminde iken malzemenin iç bölgesi hala daha yüksek sıcaklıklara sahip olduğundan, bu durum yüzeyde kalıntı çekme gerilmeleri oluşturacaktır. Aynı teori kaynak için de geçerlidir. Kaynak hattı en son soğuyan bölge olduğundan, bu durum yüzeyde kaynak hattında kalıntı gerilmelere neden olmaktadır (Withers, 2007). Singh ve arkadaşları kaynak akımı, gaz debisi ve kaynak hızı gibi kaynak parametrelerinin AA5083 alüminyum alaşımının çekme dayanımı üzerindeki etkisini TIG kaynağı kullanarak araştırmıştır. 240 amper kaynak akımı ve 7 lt/dk gaz debisi kullanıldığında maksimum 129 MPa çekme dayanıma ulaşılmıştır. Yüksek çekme mukavemeti için kaynak hızı 98 mm/dk olarak tutulmuştur. Kaynaklı birleştirilen AA5083 alüminyum alaşımının çekme dayanımı, kaynak hızının artmasıyla optimum bir değere kadar artmış, bu değerden sonra azalmıştır. Böylece maksimum çekme dayanımı için optimum kaynak parametreleri; kaynak akımı 240 amper, kaynak hızı 98 mm/dk ve gaz debisi 7 lt/dk olarak bulunmuştur (Singh ve ark., 2013). Kamat ve Kumar sürtünme karıştırma kaynağı ve TIG kaynağı ile birleştirilen alüminyum alaşımı AA6106 T6'nın mekanik özelliklerini incelemek için deneysel bir araştırma yürütmüştür. Numune boyutu 160 mm x 30 mm x 3 mm olarak seçilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan AA6106 T6 alaşımının çekme dayanımının TIG kaynağına göre daha fazla olduğunu ortaya koymuştur. Kaynak numuneleri, ana malzeme ile karşılaştırıldığında daha düşük mekanik özellikler sergilemiştir. Sürtünme karıştırma kaynağının sertliğinin TIG kaynağına göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Kamat ve Kumar, 2013).

Alüminyum kaynağına tamir yapmak, termal gerilmeler ve ısı girdisi nedeni ile istenilen bir durum olmamakla beraber, tekrar eden ısı girdileri malzemenin dayanımını azaltmaktadır. Bu nedenle mümkün olduğunca tamirat işleminden kaçınmak gerekmektedir. Ancak bazı durumlarda ise kaynak parametrelerinin yanlış seçimi, ortam koşulları ve kullanılan malzemelerden ötürü çeşitli kaynak hatalarıyla karşılaşmaktadır ve tamirat işlemi kaçınılmaz olmaktadır. Tamirat işlemi malzemenin servis şartlarında ve güvenli bir şekilde kullanılması için maksimum hassasiyet gösterilerek yapılmalıdır. Mevcut çalışmada AA6061 serisi plakaların kaynaklı birleştirmeleri için dolgu malzemesi ve kaynak parametreleri belirlenmiştir. Kaynaklı numunelere tahribatlı ve tahribatsız muayene testleri yapılmış ve elde edilen muayene sonuçlarına göre değerlendirmeler yapılmıştır. Farklı kaynak yöntemleriyle (TIG, MIG) üçer defa kaynak tamiri yapılmış ve her bir tamirat sonrası sonuçlar değerlendirilerek karşılaştırılmıştır.

Metal inert gaz (MIG) bir ergitme kaynağı olup, kaynak alanını dış atmosferden korumak için inert gazın kullanıldığı bir kaynak yöntemidir. Diğer birçok ark kaynağı yöntemine kıyasla yüksek kaliteli bir kaynak yöntemidir ve ayrıca bu yöntem yarı otomatik veya otomatik olarak uygulanabildiğinden, besleme açısından daha fazla verimlilik sağlamakta, akım ve voltaj açısından kaynak sırasında işlemi kolaylaştırmaktadır. Koruyucu gaz, tek gazlı veya gaz karışımından oluşabilir. Koruyucu gaz ve elektrot tipi seçimi kullanılan metalin cinsine bağlıdır ve elektrot makara şeklindedir. MIG kaynağı DC veya AC akım kullanılarak yapılabilir (Khafaji, 2020). Erimiş kaynak havuzu ve ark bölgesi, argon veya helyum gibi asal gazlarla korunur. MIG kaynak yöntemi alüminyum alaşımlarında yaygın olarak kullanılan bir tekniktir ve dengeli bir ark ile düşük sıçrama kaybı ve iyi kaynak penetrasyonları ile pürüzsüz bir metal transferi elde edilebilir (Okay, 2016).

Koruyucu gaz olarak genellikle argon gazı kullanıldığı için, Tungsten inert gaz (TIG) ark kaynağına argon-ark kaynağı da denir. Bir elektrik ark kaynağı yöntemi olan TIG ark kaynağı yönteminde kaynak için gereken ısı, erimeyen bir tungsten elektrot ile iş parçası arasında oluşan elektrik arki ile sağlanır. Ark bölgesi genellikle argon gazı gönderilerek korunur. Kaynak yapılacak ana metale göre kaynak ilave metali kullanılıp kullanılmayacağına karar verilir (Debeski, 2017).

Çalışmanın amacı; AA6061 serisi plakalara minimum kaynak tamiriyle kaynağın sürdürülebilirliğini sağlamak ve artan tamirat sayısı ile birlikte kabul kriterlerine bağlı olarak malzemenin servis şartlarında kullanılıp kullanılmayacağını belirlemektir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Mevcut çalışmada kaynak ana malzemesi olarak; 45° kaynak ağız açılmış 300x280x4 mm boyutlarında AA6061 T6 serisi Al plakalar kullanılmıştır.

Tablo 1 ve Tablo 2’de 6061 T6 alüminyum plakanın kimyasal kompozisyonu ve mekanik değerleri verilmiştir. (Kocaman ve Demirer, 2021).

**Tablo 1.** AA6061 T6 alüminyum plakanın kimyasal kompozisyonu

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Diğer	Al
ağ. %	0.68	0.44	0.24	0.14	0.94	0.2	0.06	0.04	0.03	Kalan

**Tablo 2.** AA6061 T6 alüminyum plakanın mekanik değerleri

Temper	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (Vickers-HV)
T6	270	260-310	16	86

Dolgu malzemesi olarak ER5356 kodlu %5 Mg (Magnezyum) alaşımlı alüminyum kaynak teli kullanılmıştır. Ana metal ile renk uyumu ve özellikle yüksek korozyon direncinden dolayı Al-Mg ve Al-Mg-Si alaşımlarının kaynağında yaygın olarak kullanılmakta olup; kimyasal bileşimi Tablo 3’te verilmiştir (Akman, 2018).

**Tablo 3.** ER5356 dolgu telinin kimyasal bileşimi (ağ. %)

Si	Fe	Cr	Mn	Mg	Cu	Zn	Ti	Diğer	Al
0,03	0,15	0,11	0,14	4,83	0,01	0,01	0,09	-	kalan

ER5356 mekanik özellikleri Tablo 4’te verilmiştir (Çüngür, 2021).

**Tablo 4.** ER5356 dolgu telinin mekanik özellikleri

Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
110-120	240-280	17-26	562-633

AA6061 T6 serisi 300x280x4 mm boyutlarındaki Al plakalar MIG kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Daha sonra aynı boyut ve bileşime sahip parçalar tekrar MIG kaynağı ile kaynatılarak, kaynaklı bölgeler taşlanmış ve MIG kaynağıyla tamirat kaynağı yapılmıştır. Aynı işlemler MIG kaynağı ile 3.tamirat aşamasına kadar tekrarlanmıştır. Aynı tamirat işlemleri (1. 2. ve 3. tamiratlar) TIG kaynağıyla da yapılmıştır. Her iki kaynak yöntemi ile gerçekleştirilen tamirat işlemleri üçer defa tekrarlanmış ve her tamirattan sonra kaynaklı bölgeler incelenmiştir. Ana kaynak

0, MIG kaynak tamirleri 1 ve TIG kaynak tamirleri 2 kodu ile gösterilmiştir. Kullanılan kaynak parametreleri Tablo 5’te verilmiştir.

**Tablo 5.** MIG ve TIG kaynak parametreleri

<b>Kaynak parametreleri</b>	<b>MIG</b>	<b>TIG</b>
Kullanılan Ana Malzemeler	6061 T6 (280x300x4 mm )	6061 T6 (280x300x4 mm )
Kaynak Makinası	Fronius TPS 400 i	EWM Tetrix
Voltaj (V)	21-23	17-19
Akım (A)	170-180	180-200
Gaz Debisi (lt/dk)	15	12
Kullanılan Gaz (% 99.99)	Argon	Argon
Kaynak hızı (cm/dak)	70-75	45-48
Tel Cinsi/Çapı (mm)	Esab 5356 / 1.2	TNT ER5356 / 3.2

AA6061 Al plakaların birinci kaynak işlemi MIG kaynak yöntemiyle yapılmıştır. Tamir işlemleri ise hem MIG hem de TIG kaynak yöntemleriyle yapıp gerekli muayeneler tamamlandıktan sonra kaynak bölgesi taşlanıp tamir kaynağı için hazır hale getirilmiştir. MIG ve TIG kaynağı ile tamir işlemi üçer kez tekrarlanmıştır. Her defasında yeni bir malzeme alınarak kaynak ve tamir kaynakları tekrarlanmıştır. Tablo 6’da, gerçekleştirilen kaynakların kodları düzenlenmiştir.

**Tablo 6.** Yapılan kaynak ve tamiratların kodları

1. MIG kaynağı: 0.0	
1. MIG Kaynak Tamiri: 1.1	1. TIG Kaynak Tamiri: 1.2
2. MIG Kaynak Tamiri: 2.1	2. TIG Kaynak Tamiri: 2.2
3. MIG Kaynak Tamiri: 3.1	3. TIG Kaynak Tamiri: 3.2

Tahribatlı muayene veya tahribatsız muayene kullanılarak kaynak muayenesi yapılabilmektedir. Tahribatlı kaynak testi, tamamlanmış kaynağın özelliklerini değerlendirmek için malzemenin fiziksel olarak tahrip edilmesini içeren bir kaynak test tekniğidir. Tahribatsız muayene, parça veya sistemin servis şartlarını bozmadan malzemedeki süreksizlikleri veya özelliklerdeki farklılıkları belirlemek için muayene, test veya değerlendirme sürecidir.

## 2.1 Tahribatsız Muayene Yöntemleri

Tahribatsız muayene, bir ürünün kalite kontrol sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. Bir ürünün imalatının tüm aşamalarında kullanılır ve aşağıdaki süreçlerde malzemenin kalitesini izlemek için kullanılır (Bhatia, 2023).

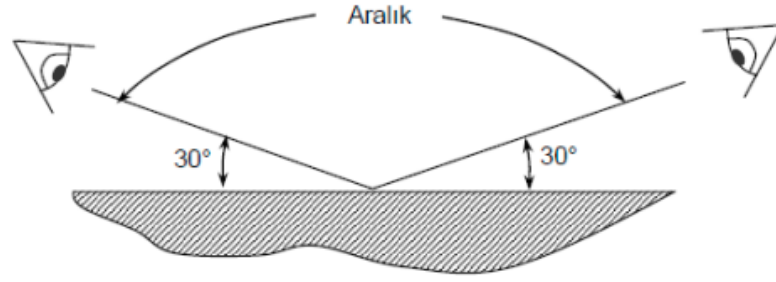
- Ürünün yapımında kullanılan hammaddelerde.
- Ürünü imal ederken.
- Hizmete sunulmadan önce bitmiş üründe.

### 2.1.1 Gözle muayene yöntemi

Görsel test, kaynakta yüzey süreksizliklerini belirlemek için gözle veya yardımcı bir ekipman kullanarak yaptığımız bir tahribatsız muayene yöntemidir. Görsel testler, test yüzeyinin yeterli şekilde aydınlatılmasını ve test cihazının uygun şekilde görülmesini gerektirir.

TS EN 13018 (Genel Kurallar) standardına göre, genel gözle muayene için en az 160 lux, yerel gözle muayene için en az 500 lux aydınlatma gerekmektedir. TS EN ISO 17637 (Kaynaklar için Genel Kurallar) standardına göre, Muayene yüzeyinin aydınlanma şiddeti en az 350 lüks olmalıdır; ancak bu değer 500 lüks olması tavsiye edilmektedir. Doğrudan muayene yapılırken, muayene yüzeyi ile göz arasındaki mesafe 600 mm’yi geçmemiş olması gerekmektedir. Dolaylı gözle

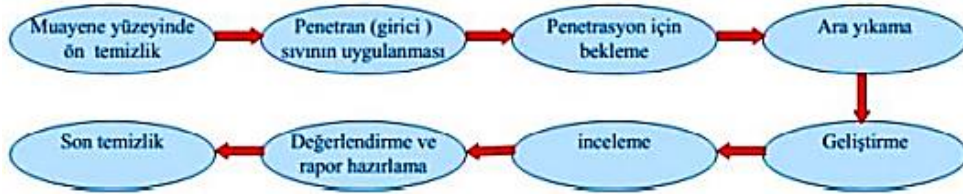
muayenede bu şart gözetmeksizin yapılabilmektedir. (Gönül, 2023). Muayene açısı Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Muayene açısı

### 2.1.2 Sıvı penetrant muayenesi

Sıvı penetrant testi, malzemelerdeki veya kaynak yüzeyindeki küçük sızıntıları, çatlakları, gözenekleri ve süreksizliği tespit etmek için tasarlanmıştır. Bu prosedürde, önceden belirlenmiş bir süre boyunca ürün yüzeyine sıvı nüfuz edici bir boya püskürtülür. Penetrant daha sonra kılcal etki yoluyla en küçük çatlaklara veya gözeneklere sürünerek girer. Yüzey kuruduktan sonra, kusurda kalan penetrantı emen ve konumu, boyutu ve türü de dahil olmak üzere tüm kusurları gösteren bir geliştirici uygulanır. Sıvı penetrant testi, görünür ışık veya floresan aydınlatma ortamında yapılır. (Bhatia, 2023). Penetrant testi işlemi Şekil 2’deki sıra izlenerek yapılır (Gönül, 2023). TSE EN ISO 3452-1 standartına uygun penetrant ürün ailesi Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 2. Penetrant testi işlem sırası



Şekil 3. Penetrant ürün ailesi ( MR 85 alkol, MR 68C penetrant sıvısı, MR 70 geliştirici)

### 2.1.3 Radyografik muayene

Radyografik test, bir bileşenin içinin görüntülenmesini sağlayan bir görüntüleme test yöntemini ifade eder. Radyografik X ışınlarını kullanır ve bu ışınlar kaynağın içinden geçer ve malzemenin arkasına yerleştirilen bir film üzerinde gölge bir resim oluşturur. Bu ışınların dalga boyu 0.001 Angstrom mertebesinde çok kısadır ve genellikle radyoaktif bir malzeme tarafından üretilen gama ışınları (Co-60 ve Ir-192 radyoizotopları), saha ayarlarında kaynakların incelenmesi için de kullanılır

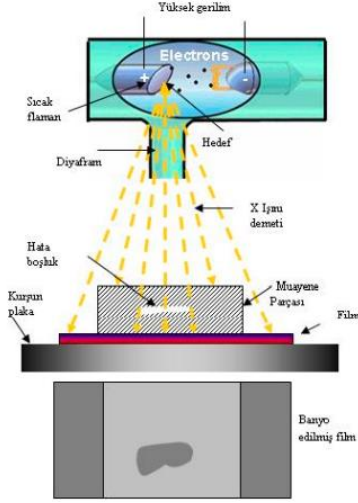
(Bhatia, 2023). Şekil 4 a) 'da X ışını ile yapılan muayene (Gönül, 2023) ve 4 b) 'de kullanılan cihaz gösterilmektedir.

Alüminyum parçalar için;

Seçilen gerilim: 120 keV

Seçilen akım değeri: 1,9 mA,

Hesaplanan poz süresi: 50 sn



a)



b)

Şekil Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.. a) X ışını ile yapılan muayene b) Radyografik muayene cihazı

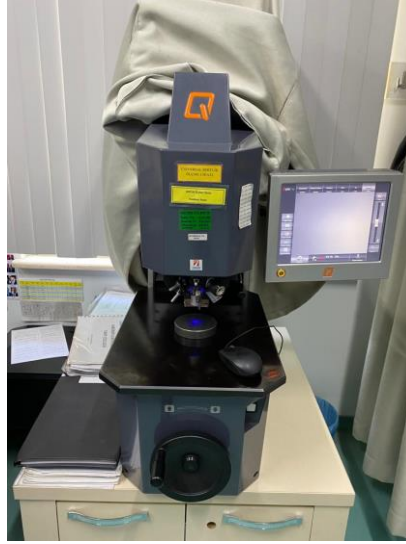
## 2.2 Tahribatlı Muayene Yöntemleri

Tahribatlı kaynak testi, adından da anlaşılacağı gibi sağlamlığını ve özelliklerini değerlendirmek için tamamlanmış bir kaynağın fiziksel olarak tahrip edilmesini içerir. Bu testler, esas olarak bir numunenin performansını veya malzemenin farklı yükler altındaki davranışını değerlendirmek için gerçekleştirilir. Bu testlerin gerçekleştirilmesi, daha fazla bilgi vermesi ve yorumlanması tahribatsız testlere göre çok daha kolaydır.

### 2.2.1 Sertlik testi

Malzemelerin aşınmaya, çizmeye veya kesilmeye karşı direnç gösterme yeteneği sertlik olarak bilinir. Malzemenin kalıcı deformasyona direnme özelliğidir. Kaynak sertlik testi, taşlanmış, parlatılmış veya parlatılmış ve dağlanmış bağlantı bölgesinin bir kesiti üzerinde yapılır. Kaynak merkez hattı, dolgu yüzeyi veya kök bölgeleri, ITAB ve ana metal üzerinde girintiler oluşturmak suretiyle yapılır.

Kaynaklarda Brinell, Rockwell, Vickers ve Knoop sertlik testleri, en basit ve kolay değerlendirilebilen mekanik özelliklerden biri olan sertliği belirlemek için kullanılabilir. Sertlik testinin türü, malzemenin sertliği, mukavemeti, kaynaklı bağlantının boyutuna göre değişir (Bhatia, 2023). Şekil 5'te, kullanılan Qness marka sertlik ölçüm cihazı verilmiştir.

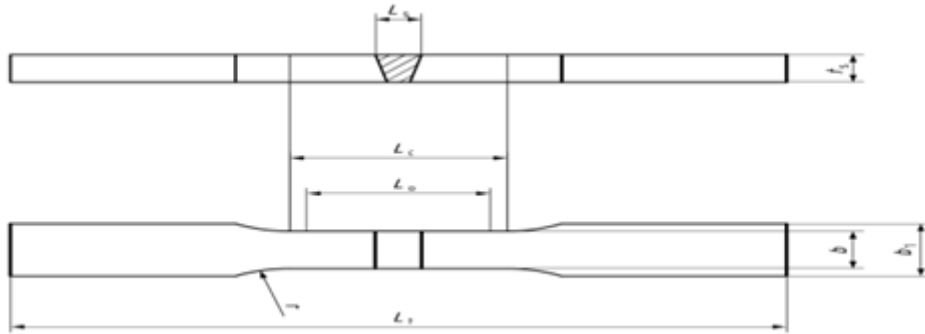


Şekil Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.. Qness marka sertlik ölçüm cihazı

### 2.2.2 Çekme deneyi

Çekme mukavemeti, bir metalin onu ayıran kuvvetlere dayanma kabiliyetini ifade eder. Enine çekme testi, enine çekme dayanımını, akma dayanımını, uzama gerilimini, statik yük altında bir alın bağlantı alanının azalmasını ölçmek için yapılır. Tasarımın büyük bir kısmı kaynaklı bağlantıdaki çekme özelliklerine dayandığından, ana metalin, kaynak metalinin, taban ile kaynak arasındaki bağın ve ısıdan etkilenen bölgenin çekme özelliklerinin tasarım gereksinimlerine uyması önemlidir. Nihai çekme mukavemeti, malzemelerin mekanik performanslarını belirlemede önemli bir yer tutar (Bhatia, 2023).

Kaynaklı parçaların çekme numuneleri TS EN ISO 4136 (Metalik malzemelerin kaynakları üzerinde tahribatlı deneyler - Enine çekme deneyi) standardına göre hazırlanmıştır. Deney Instron Marka cihaz ile yapılmıştır. Şekil 6'da çekme numunesinin temsili şekli ve Şekil 7'de Instron marka çekme test cihazı görülmektedir.



Şekil 6. Çekme numunesi temsili şekil

(Numune Ölçüleri:  $L_t = 200$  mm,  $b = 25$  mm,  $t_s = 4$  mm,  $L_c = 80$  mm)



Şekil 7. Instron marka çekme test cihazı

### 2.2.3 Makro inceleme

Bu yöntem, kaynaklı bağlantıdan küçük numunelerin çıkarılmasını gerektirir. Bu numuneler daha sonra zımparalanır, parlatılır ve kullanılan temel malzemeye bağlı olarak hafif bir asit karışımı kullanılarak dağlanır. Asitle aşındırma, kaynağın iç yapısının net görüntüsünü sağlar. Numunenin incelenmesi, nüfuz etme derinliğini ve füzyon eksikliği, yetersiz kök penetrasyonu, iç gözeneklilik ve kaynak ile ana malzeme arasındaki geçiş bölgesindeki çatlamanın kanıtlarını ortaya çıkarır (Bhatia, 2023).

### 2.2.4 Mikroyapı inceleme

Yöntem, çatlaklar, mikroskobik boyuttaki kalıntılar, tane sınırları, kaynak metalinin yapısı, ısıdan etkilenen bölge, kaynak metalindeki mikro bileşenlerin dağılımı gibi özellikleri incelemeye imkan sunar. Mikroyapı incelemeleri OLYMPUS marka optik mikroskop ile yapılmıştır. Bu yöntem malzemenin iç yapısını incelemek için uygulanmaktadır. Yöntemin aşamaları: numune alma, bakalitleme, zımparalama, parlatma, dağlama ve mikroskobik incelemedir. Numunenin alınacağı bölge tespit edildikten sonra kesici taş, testere vb. aletlerle numune kesilir. Kesme işlemi yaparken malzemede plastik deformasyona sebebiyet vermeyecek ve ısı girdisinin az olduğu bir yöntem seçilmelidir. Çünkü malzemenin orijinal iç yapısı da incelenecektir. Zımparalama işleminde 320, 400, 600, 800 ve 1200 numaralı zımparalar kullanılmıştır. Zımparalama işleminden sonra numuneler çuha kaplı parlatma disklerinin üstüne alınır ve parlatma işlemi tamamlanır. Numunenin iç yapı özelliklerinin incelenmesi için dağlanması gerekmektedir. Bu işlem Keller (2ml HF, 3ml HCl, 5ml HNO<sub>3</sub>, 190 ml saf su) reaktifiyle yapılmıştır. Dağlama işlemi yaparken numuneyi dağlama çözeltisinde çok fazla bekletmemek gerekmektedir aksi halde kararına meydana gelmektedir. Şekil 8'de makroyapı inceleme cihazı ve optik mikroskop cihazı görülmektedir.



a)



b)

Şekil 1. a) Struers marka welding expert 5 makroyapı inceleme cihazı, b) Olympus marka optik mikroskop.

### 2.3. SEM-EDS Analizi

Uygun metalografik standartlarda hazırlanmış numunelerin kaynak dikişi ve ITAB bölgesinin mikro yapılarının incelenmesi ve yorumlanması için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Mikroyapıların görüntülediği Joel marka JSM-6060LV model SEM cihazı Şekil 9'da görülmektedir. Ayrıca numuneler üzerindeki elementel kompozisyonu belirlemek için enerji dağılımlı spektrometre (EDS) analizi uygulanmıştır. EDS analizi SEM cihazı ile birlikte çalıştığı için, element kompozisyonu aynı cihaz üzerinden yapılmıştır.



Şekil 2. Joel marka JSM-6060LV model SEM cihazı

### 2.4. X-Işınları Analizi

MIG ve TIG kaynağı sonrasında yapıda oluşan fazların belirlenmesi için X-ışınları analizleri (XRD) yapılmıştır. Yapılan XRD analizinde, dalga boyu  $\lambda=1,54059$  nm olan  $\text{CuK}\alpha$  ışın demeti kullanılarak tarama açısı ( $2\theta$ ) 0 ile 90 ° aralığında olacak şekilde RIGAKU marka D/MAX/2200/PC model X-ışınları difraktometresi kullanılmıştır. Şekil 10'da kullanılan XRD cihazının fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 3. X-ışınları difraksiyon analizi cihazı



### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

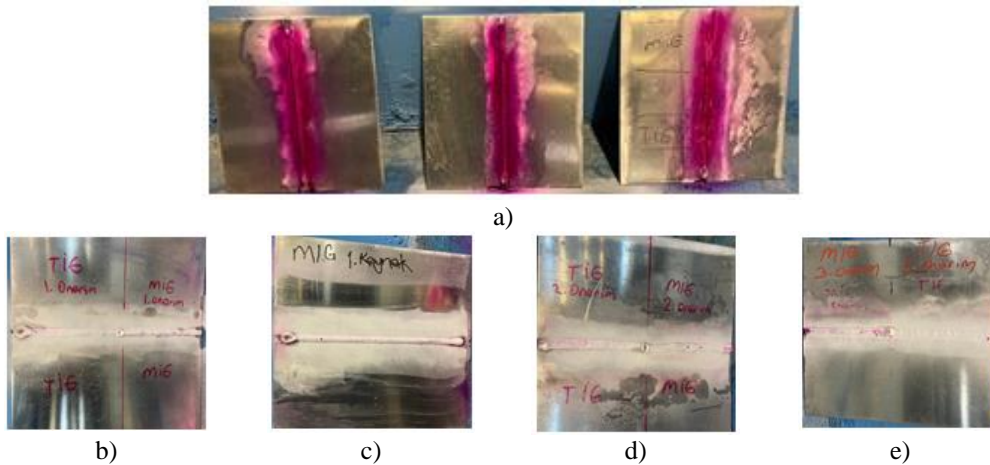
#### 3.1 Tahribatsız Testler

4 mm kalınlığındaki AA6061 T6 alüminyum plakalar alın kaynağıyla birleştirildikten sonra tamirat yapılmayan, MIG ve TIG kaynaklarıyla üçer defa tamir kaynağı yapılan numunelerin gözle muayenesi TS EN ISO 10042 standartına göre yapılmıştır. Kullanılan lazerli kaynak ölçüm cihazı ve mercek Şekil 11’de verilmiştir. Kaynaktan sonra olması gereken ölçü sınır değerleri standartta göre cihaza girilir ve cihaz kaynak dikişi üzerinde gezdirilir. Kabul kriterleri içerisinde kalan ölçüler şekilde görüldüğü gibi yeşil tonda, dışında kalan ölçüler ise kırmızı tonda belirtmektedir. Cihaz ekranında da görüldüğü gibi kep yüksekliği 2.3 mm, kep genişliği 9.9 mm ve yanma oluğu 0 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 11. Servo-Robot marka Wiki-Scan lazerli kaynak ölçüm cihazı ve mercek

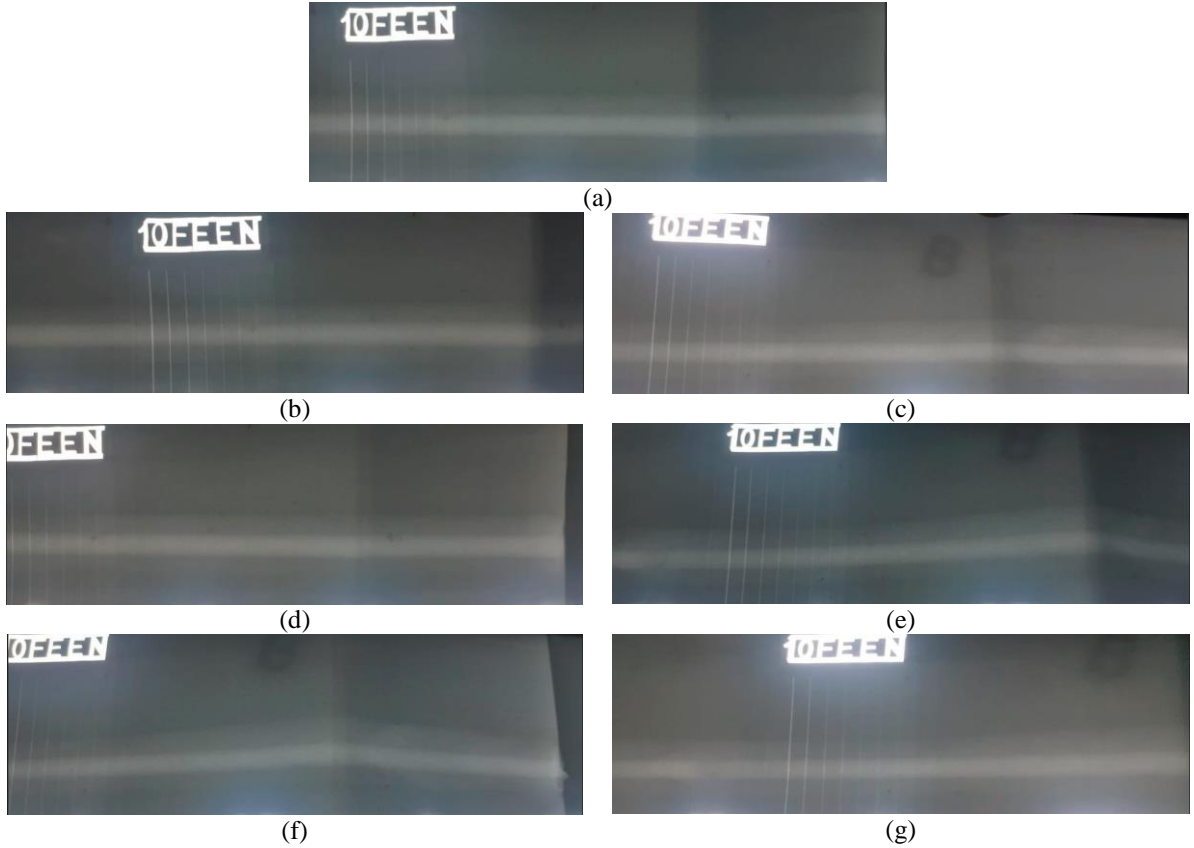
Kaynak yapılan parçaların sıvı penetrant muayenesi için kaynak ve ITAB bölgeleri MR 85 alkolle temizlenmiş ve yüzeylerine standartlara uygun MR 68 C penetrant sıvısı uygulanmıştır ve 10 dk. beklenilmiştir. Yüzeide kalan penetrant su ve bez yardımıyla temizlendikten sonra MR 70 geliştirici uygulanmıştır. Şekil 12’de penetrant ve geliştirici uygulaması görülmektedir. Sonuçlar TSE EN ISO 23277 (Kaynakların tahribatsız muayenesi-Kaynakların penetrant muayenesi-Kabul seviyeleri) standartına göre değerlendirilmiştir. Kaynaklara uygulanan penetrant test (PT) sonucunda herhangi bir çatlığa rastlanmamıştır fakat gözenek oluşumu gözlemlenmiştir.



Şekil 12. a) Penetrant uygulama b) 0.0 nolu tamirat yapılmayan, c) 1.1 ve 1.2 nolu 1. tamirler d) 2.1 ve 2.2 nolu 2. tamirler ve e) 3.1 ve 3.2 nolu 3. tamir yapılan parçaların PT sonuçlarına ait makro görüntüler

Şekillerde de gözüktüğü gibi TIG kaynağıyla yapılan kaynaklar görsel olarak daha iyi gözükmetedir. MIG kaynağındaki gözenek oluşumu TIG kaynağına göre daha fazladır. Gözenekliliğin sebebi kaynak havuzunu terk etmeyen hidrojen kaynaklanmaktadır ve bu durum en yaygın görülen kaynak hatalarından biridir. MIG kaynağında tamirat sayısı arttıkça gözeneklerde de artış görülmüştür. TIG kaynağında ise durum değişmemiştir.

Kaynaklı numunelerin radyografik muayenesi için ICM SiteX model cihaz kullanılmıştır. TS EN ISO 17636-1 (Kaynak dikişlerinin tahribatsız muayenesi, Radyografik, muayene Bölüm 1: Filmler X ve gama ışını teknikleri) standartına göre muayene parametreleri belirlenmiştir. Radyografik muayene sonuçları Şekil 13'te verilmiştir.

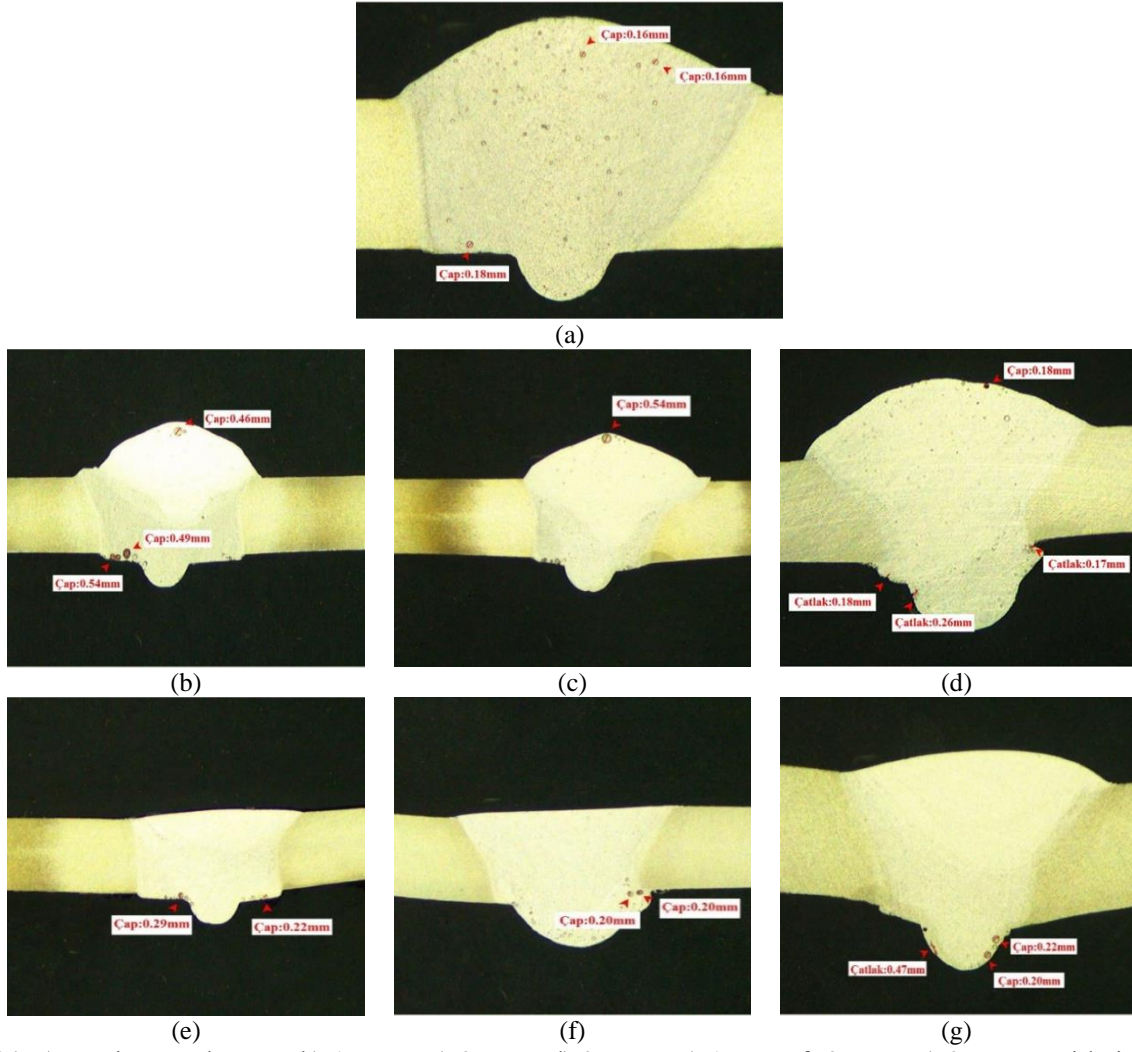


**Şekil 13.** a) Tamirat yapılmayan, b) 1. MIG, c) 1. TIG tamirleri, d) 2. MIG, e) 2. TIG tamirleri, f) 3. MIG, g) 3. TIG tamirleri yapılan parçaların radyografik muayene görüntüleri

Radyografik muayene görüntülerinde TSE EN ISO 10675-2 standardına göre çatlak, ergime noksanlığı, yanma oluşu gibi herhangi bir süreksizliğe rastlanmamıştır.

### 3.2 Tahribatlı Testler

Numune hazırlama işlemlerinden sonra makroyapı incelemeleri TS EN ISO 10042 (Kaynak-Aluminyum ve alaşımlarında ark kaynaklı birleştirmeler-düzgünsüzlükler için kalite seviyeleri)'ye göre değerlendirilmiştir. Kalite seviyesi C'ye göre tek gözenek çapının malzeme kalınlığının 0.3 katından fazla olmaması gerekmektedir. Tamiratsız ve tamir yapılan numunelere ait makroyapı görüntüleri Şekil 14'te verilmiştir.



**Şekil 14.** a) Tamirat yapılmayan, b) 1. MIG, c) 2. MIG d) 3. MIG, e) 1. TIG, f) 2. TIG, g) 3. TIG tamirleri yapılan numunelere ait makroyapı görüntüleri

Kaynak işlemi ve sonrasında tamirat kaynakları yapılan numunelerin makro görüntüleri Şekil 14'te, 0.0 nolu ilk uygulanan MIG kaynağı sonrası alınan makroyapı görüntüleri Şekil 14 a'da görülmektedir. Kaynak uygulanan levhanın kalınlığı 4mm'dir. Kaynak bölgesinde hidrojen gazı kaynaklı gözenekler bulunmakta olup bu durum yaygın bir kaynak hatasıdır. Alınan makro görüntülere göre 0.16-0.18 mm çaplarında gözeneklerin mevcut olduğu tespit edilmiştir. İlk kaynak işleminden sonra yüzey taşlanmış ve birinci MIG kaynağı onarımı yapılmıştır. Onarım sonrası alınan makroyapı görüntüleri Şekil 14 b'de verilmiştir. Yapılan MIG tamiratına bakılarak ITAB içerisindeki gözenek boyutlarının 0.46-0.54 mm arasında olduğu gözlemlenmiştir. Gözenekliliğin nedeninin, katılaştıran kaynak metali havuzundaki hidrojen gazının varlığı, nem ve kaynak öncesi temizliğin yeterince yapılmaması olduğu düşünülmektedir. İlk kaynak işleminden sonra yüzeyi taşlanan numuneye birinci TIG kaynağı tamirata uygulanmıştır. Gözeneklenmelerin kaynak kökünde toplandığı ve 0.22-0.29 mm çaplarında değişim gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 14c). Artan ısı girdisi sebebiyle malzemede burulmaların da başladığı görülmüştür. Birinci kaynak tamir işlemlerinden sonra tamirat yapılan kaynaklar taşlanarak ikinci kaynak tamir işlemine hazırlanmış ve hazırlanan numuneye MIG kaynağı ile ikinci tamirata yapılmıştır. Gözeneklenmelerin kaynak kepinde ve kökünde devam ettiği ve en büyük gözenek boyutunun 0.54 mm çapında olduğu görülmüştür (Şekil 14d). Birinci kaynak tamir işlemlerinden sonra yüzeyi taşlanan numuneye ikinci TIG kaynağı tamirata uygulanmıştır. Gözeneklenmelerin kaynak kökünde toplandığı ve en büyük

gözenek boyutunun 0.2 mm çapında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 14e). Artan ısı girdisi sebebiyle malzemede burulmaların daha da arttığı görülmüştür. İkinci kaynak tamir işlemlerinden sonra tamirat yapılan kaynaklar taşlanarak üçüncü kaynak tamir işlemine hazırlanmıştır. Üçüncü MIG tamiratından sonra gözeneklenmelerin kaynak kepinde ve kökünde devam ettiği ve en büyük gözenek boyutunun 0.18 mm çapında olduğu görülmüştür. (Şekil 14f). Üçüncü TIG kaynağı tamiratından sonra gözeneklenmelerin kaynak kökünde toplandığı ve en büyük gözenek boyutunun 0.22 mm çapında olduğu tespit edilmiştir. Artan ısı girdisi sebebiyle malzemede burulmaların daha da arttığı görülmüştür (Şekil 14g). Üçüncü kaynak tamiratlarından sonra artan termal gerilmelerin de etkisiyle kaynak kök bölgesinde kılcal çatlaklar gözlemlenmiştir.

MIG kaynağı sonrası ve MIG ve TIG tamirat işlemlerinden sonra yapılan çekme testi sonuçları Tablo 7’de verilmiştir. TS EN ISO 15614-2 numaralı standartta göre kaynak yapılmış 6000 serisi alüminyum alaşımlarında doğal yaşlanma sonucunda elde edilen çekme mukavemet değeri ana malzemenin minimum çekme mukavemet değerinin 0.6 katının, suni yaşlandırmada ise 0.7 katının altında olmamalıdır.

**Tablo 7.** MIG kaynağı ile tamiratsız ve MIG ve TIG ile üç kez tamirat yapılan numunelerin çekme testi sonuçları

Kod	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Yük (N)	Alan Daralması (%)	Hesaplanmış Uzama (%)
<b>MIG</b>					
0.0	139.1674	203.3048	17890.8223	32.5392	8.057
1.1	132.8321	196.0877	17255.7148	45.4800	8.226
2.1	134.6181	181.0924	15936.1348	46.6392	8.547
3.1	106.2336	180.2296	15684.2070	33.3663	9.811
<b>TIG</b>					
1.2	124.3719	186.1235	16378.8672	43.9273	8.868
2.2	125.4717	179.4365	15702.4160	50.1477	9.698
3.2	91.82285	175.1522	15413.3974	33.4095	9.796

Çekme testi sonuçlarından da anlaşılacağı üzere her iki kaynak yönteminde de tamirat sayısı arttıkça malzemenin akma ve çekme gerilmelerinde azalmalar görülmüştür. Üçüncü kaynak tamirinde bu değerler gözle görülür bir şekilde azalmıştır. Artan ısı girdisi ve termal gerilmelerin de malzemenin dayanımını azalttığını göstermektedir. Ana malzemenin çekme mukavemetinin 260-310 MPa olduğu bilinmektedir. Elde edilen test sonuçlarına göre en düşük çekme mukavemetinin 3. TIG kaynak tamiri sonucunda 175.15 MPa olduğu saptanmıştır. MIG kaynağı sonucu elde edilen çekme değerleri TIG kaynağına göre daha yüksek çıkmıştır. TIG kaynağındaki ısı girdisinin daha fazla olmasından ötürü bu durum ortaya çıkmıştır. Isı girdileri MIG kaynağında 214 J/mm, TIG kaynağında ise 285 J/mm civarında hesaplanmıştır. Isı girdisi hesaplama formülü (Denklem 3.1) şu şekilde ifade edilir:

$$Q = k (VxI)/w \quad (3.1)$$

Q: Isı girdisi (j/mm)

k: enerji verimlilik faktörü (0.7)

V: Kaynak gerilimi (volt)

I: Akım (amper)

w: Kaynak hızı (mm/sn)

Vickers sertlik ölçümleri; tamiratsız ve MIG ve TIG kaynak yöntemleri ile 1.,2. ve 3. tamiri yapılan tüm numunelerde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ortalama Vickers (HV 0.5) sertlik değerleri Tablo 8’de görülmektedir.

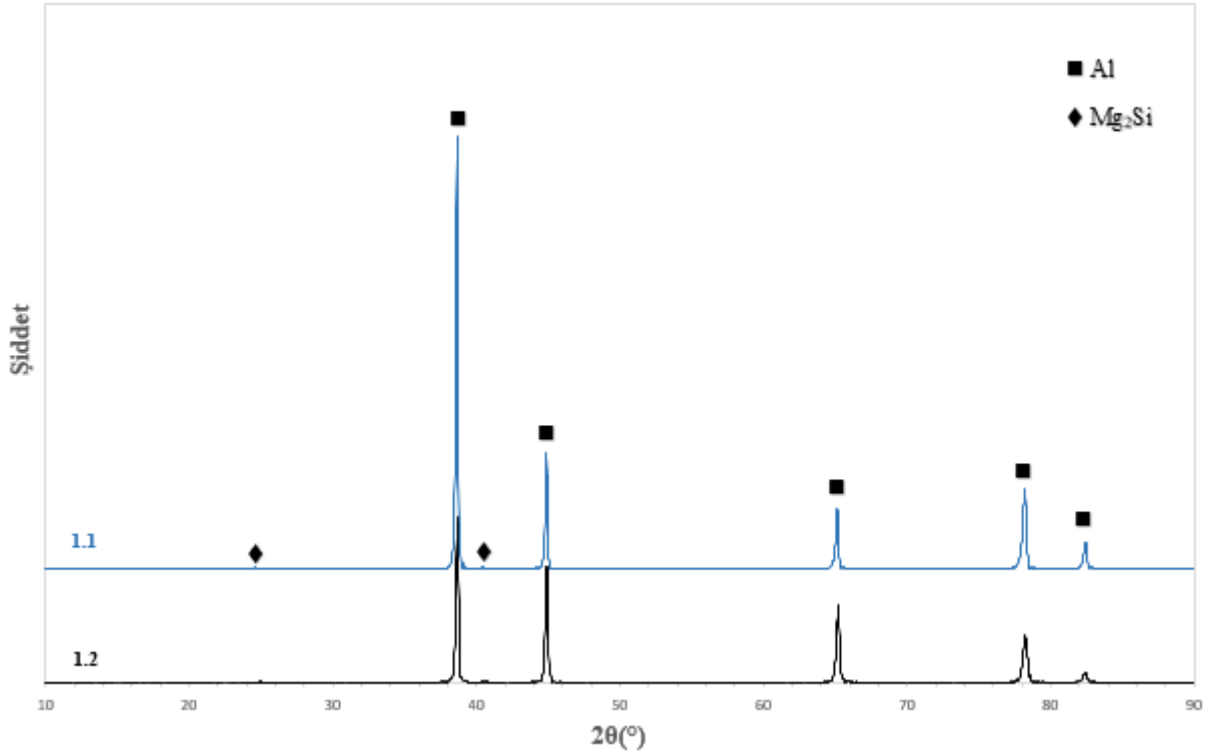
**Tablo 8.** Kaynak ve tamiri yapılan numunelerin ortalama Vickers sertlik değerleri

	0.0	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2
<b>Ana malzeme</b>	87,2	86,5	84,9	87	84,7	85,5	86,5
<b>ITAB</b>	70,5	68,5	68,4	68,9	67,5	65,4	65,4
<b>Kaynak</b>	73,2	73,4	71,2	72,6	72,5	73,2	69,3

Sertlik ölçümü sonuçlarına göre en yüksek değeri ana metalde, daha sonra kaynak bölgesinde ve en düşük değerleri de ITAB bölgesinde olduğu görülmektedir. En fazla ısı girdisi ITAB bölgesinde olduğundan dayanım azalmış ve en düşük sertlik değerleri de burda görülmüştür. TIG kaynağındaki ısı girdisi daha fazladır ve buna bağlı olarak dayanım ve sertlik değerleri MIG kaynağına göre daha düşüktür.

### 3.3 XRD Analizleri

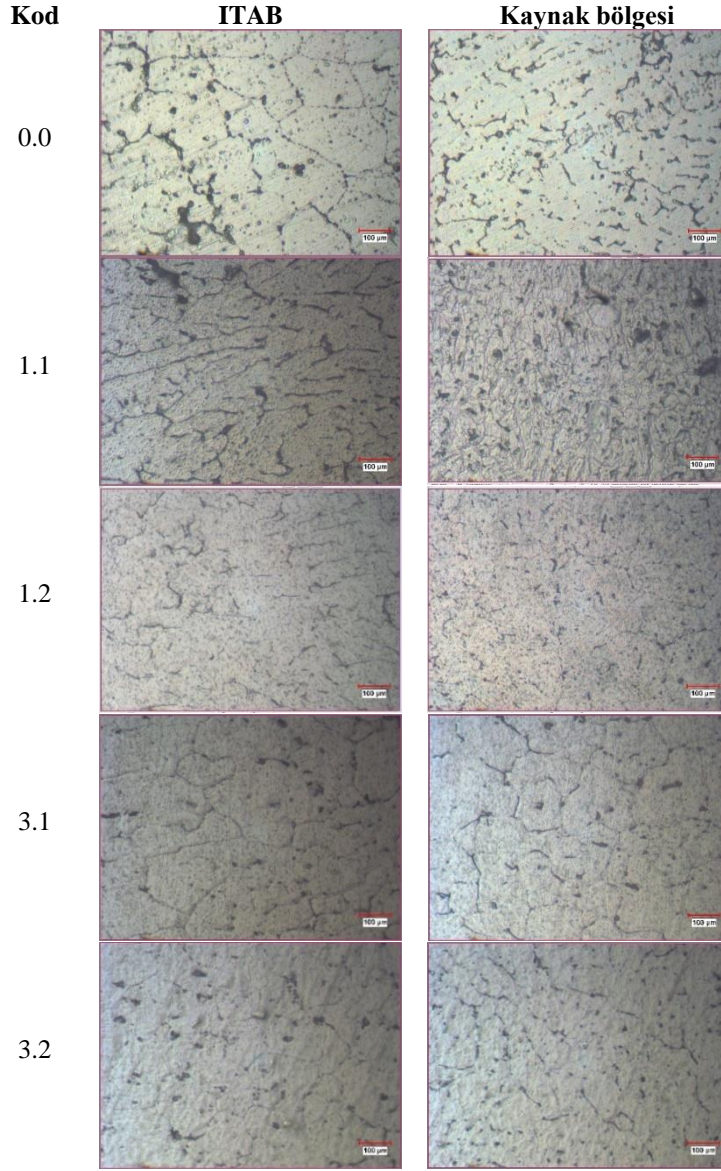
1.1 (1.MIG kaynak tamiri) ve 1.2 (1.TIG kaynak tamiri) kodlu numunelerin XRD analizleri Şekil 15'te verilmiştir.

**Şekil 15.** 1.1 ve 1.2 kodlu 1. MIG-TIG kaynak numunelerine ait XRD analizi

XRD sonuçlarında da alüminyum pikleri ile birlikte,  $Mg_2Si$  fazının ise düşük şiddette bir pik verdiği gözlemlenmiştir. XRD analizinde yapıda herhangi oksitli bir bileşiğe rastlanmamıştır.

### 3.4 Mikroyapı Analizleri

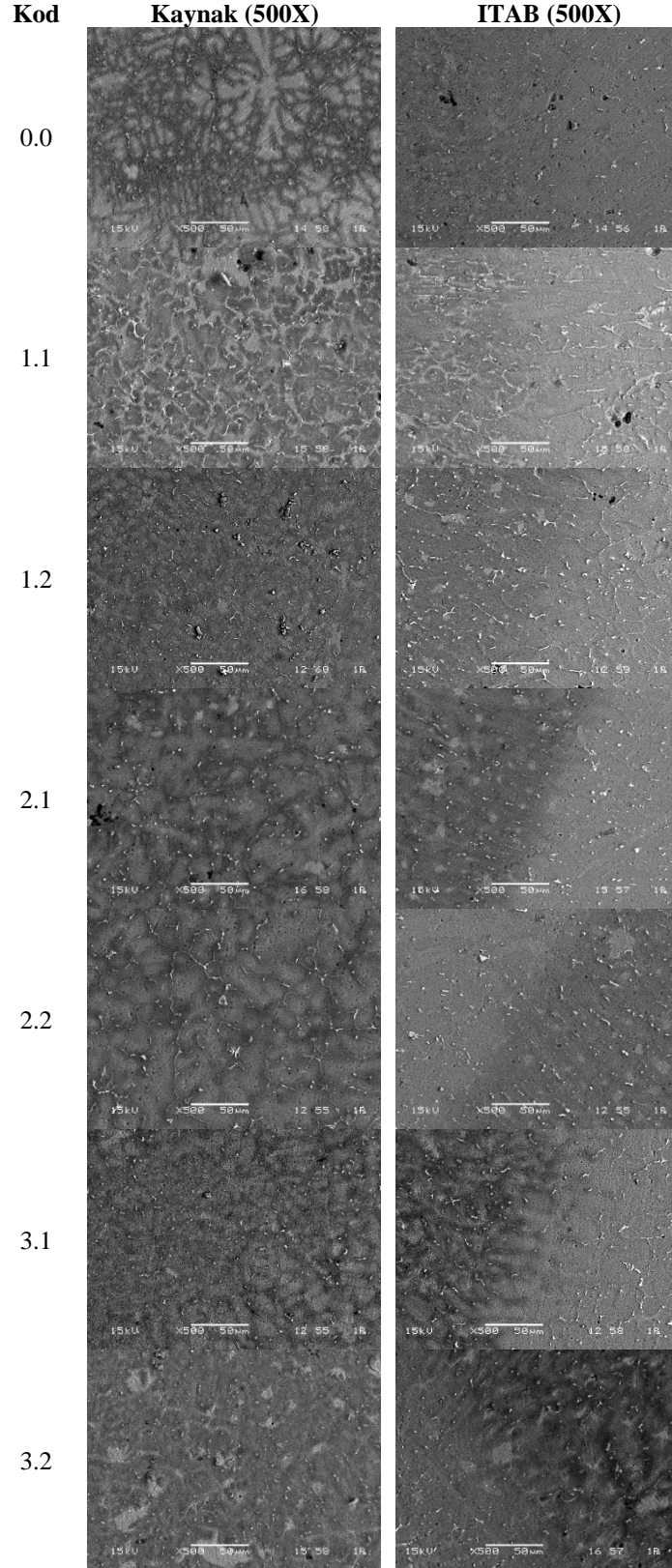
0.0, 1.1, 1.2, 3.1, 3.2 kodlu numunelerin ITAB ve kaynak bölgesinden alınan optik mikroyapı görüntüleri Şekil 16'da verilmiştir.



**Şekil 16.** Kaynak tamiri yapılmamış MIG kaynağının ve MIG ve TIG kaynaklarıyla 1. ve 3. tamiraty yapılmış numunelerin ITAB ve kaynak bölgelerinden alınan 50X büyütmedeki mikroyapı görüntüleri

Koyu siyah parçacıklar  $Mg_2Si$  taneciklerini temsil etmektedir. Mg hem ana malzemede hem de ER5356 kodlu dolgu metalinde mevcut olup XRD analizleri ile varlığı tespit edilmiştir. Tamirat sayısı ve ısı girdisi arttıkça tane boyutlarındaki artış ile birlikte ITAB bölgesindeki tanelerde irileşme görülmektedir. Birinci ve üçüncü tamirat sonrası ITAB bölgelerindeki tane boyutu farkı açıkça görülmektedir.

Kaynak ve ITAB bölgesine ait SEM görüntüleri Şekil 17’de verilmiştir. SEM görüntülerine baktığımızda tamirat sayısı arttıkça yapıda özellikle ITAB bölgesinde ısı girdisinin etkisiyle tane boyutunda irileşme dikkat çekmektedir. Kaynak bölgesinde ise gözle görünür bir değişiklik olmadığı belirtilebilir.

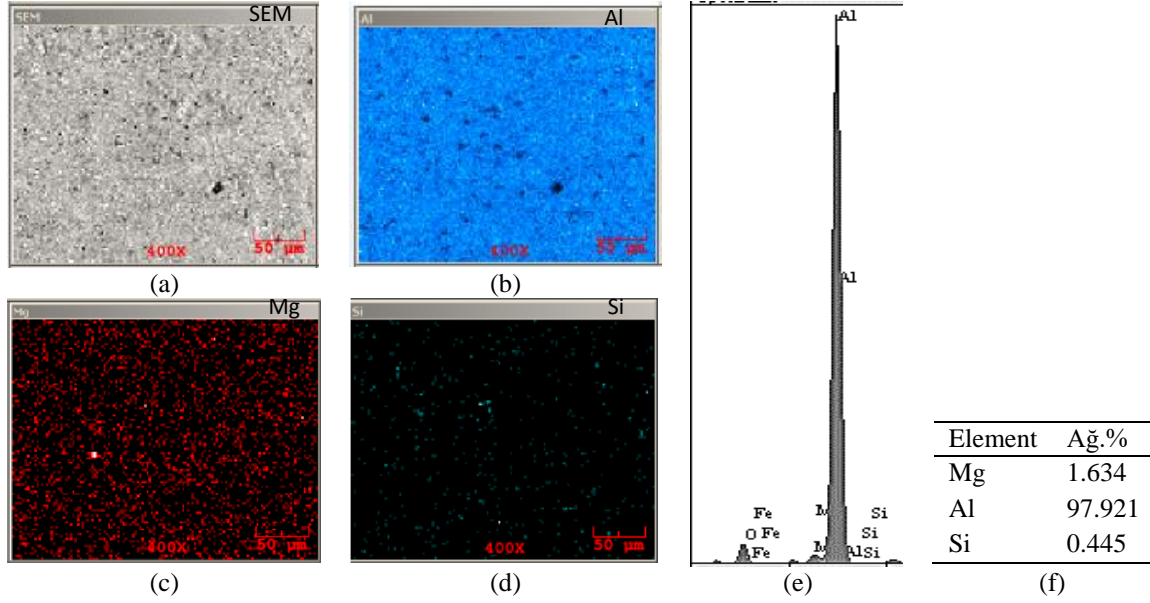


Şekil 17. Kaynak tamiri yapılmamış MIG kaynağının ve MIG ve TIG kaynaklarıyla 3 kez tamirata yapılmış numunelerin ITAB ve kaynak bölgelerinden alınan 500X büyütmedeki SEM görüntüleri

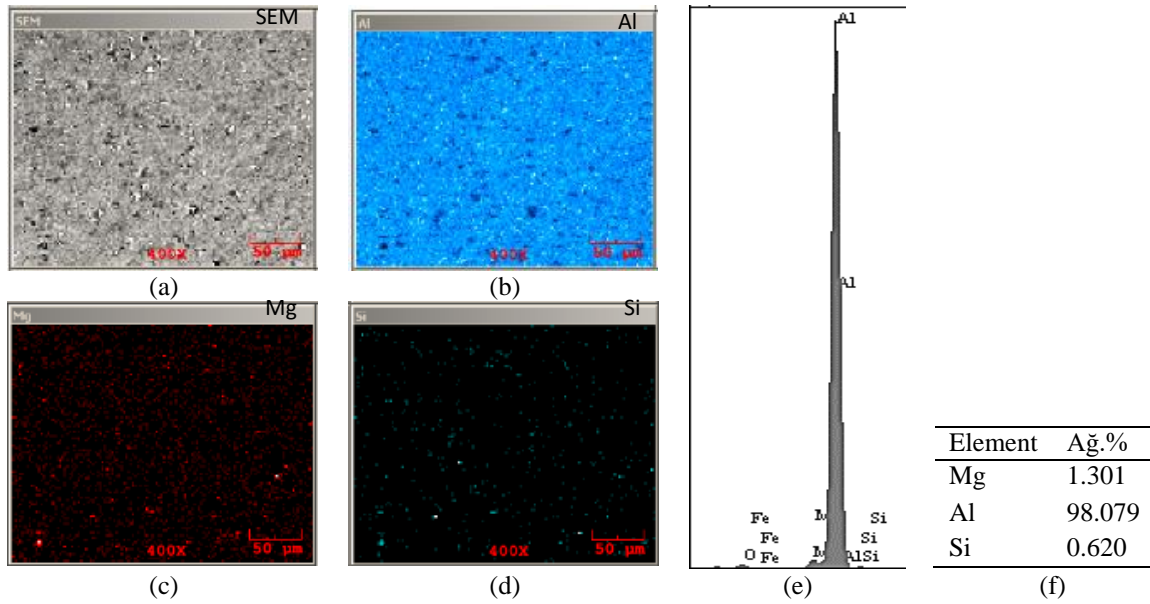
### 3.5 SEM-EDS Analizleri

0.0, 1.1, 1.2, 3.1, 3.2 kodlu numunelerin ITAB bölgelerindeki element dağılımını belirlemek için genel EDS analizleri yapılmış, Şekil 18’de tamirat yapılmayan 0.0 kodlu numunenin EDS analizi

ve elemental haritalaması (mapping) Şekil 19’da birinci MIG kaynağı tamiratu yapılan numunenin, Şekil 20’de birinci TIG kaynağı tamiratu yapılan numunenin, Şekil 21’de üçüncü MIG kaynağı tamiratu yapılan numunenin ve Şekil 22’de üçüncü TIG kaynağı tamiratu yapılan numunenin EDS analizi ve elemental haritalaması verilmiştir.



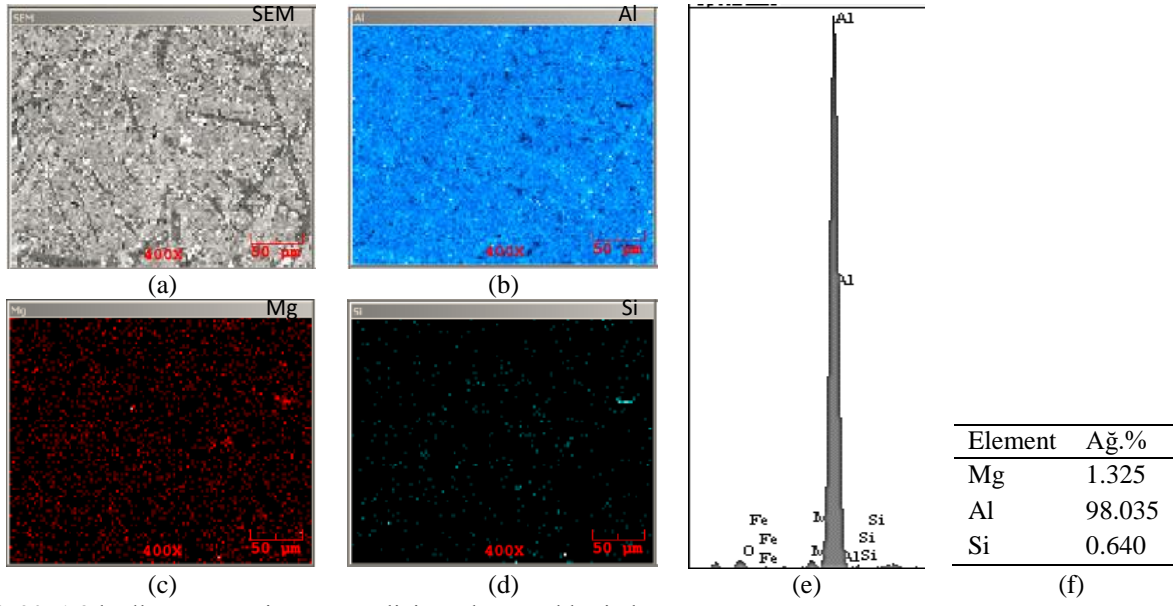
Şekil 18. 0.0 kodlu numunenin EDS analizi ve elemental haritalaması



Şekil 19. 1.1 kodlu numunenin EDS analizi ve elemental haritalaması

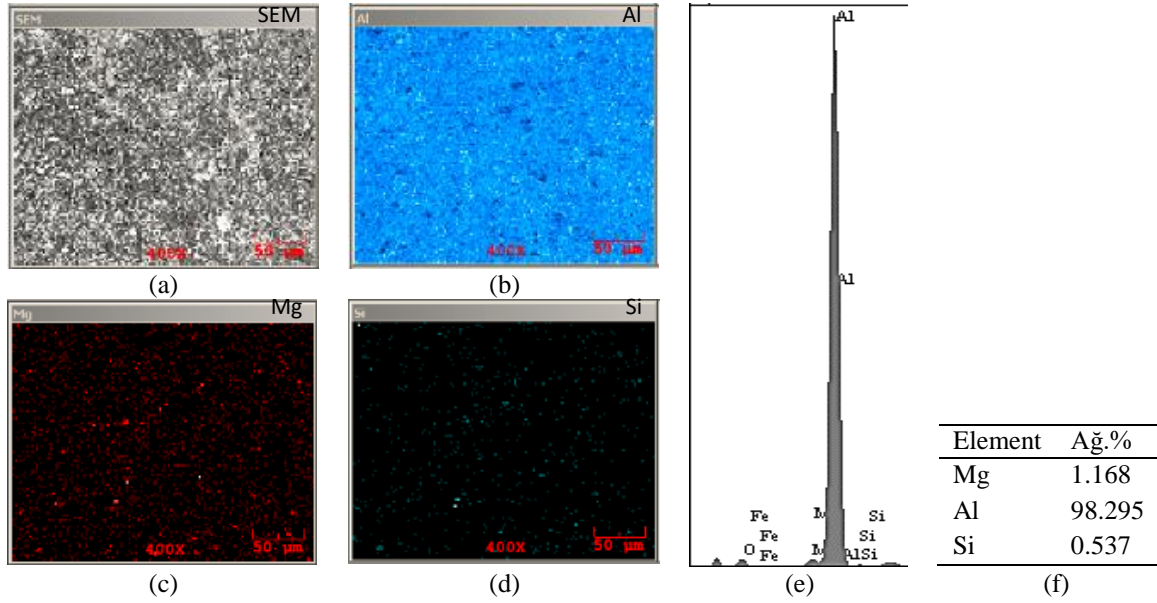
Birinci MIG kaynağı tamiratındaki elemental dağılıma göre, mukavemet artırıcı Mg’nin tamirat yapılmayan numuneye göre azaldığı görülmektedir.





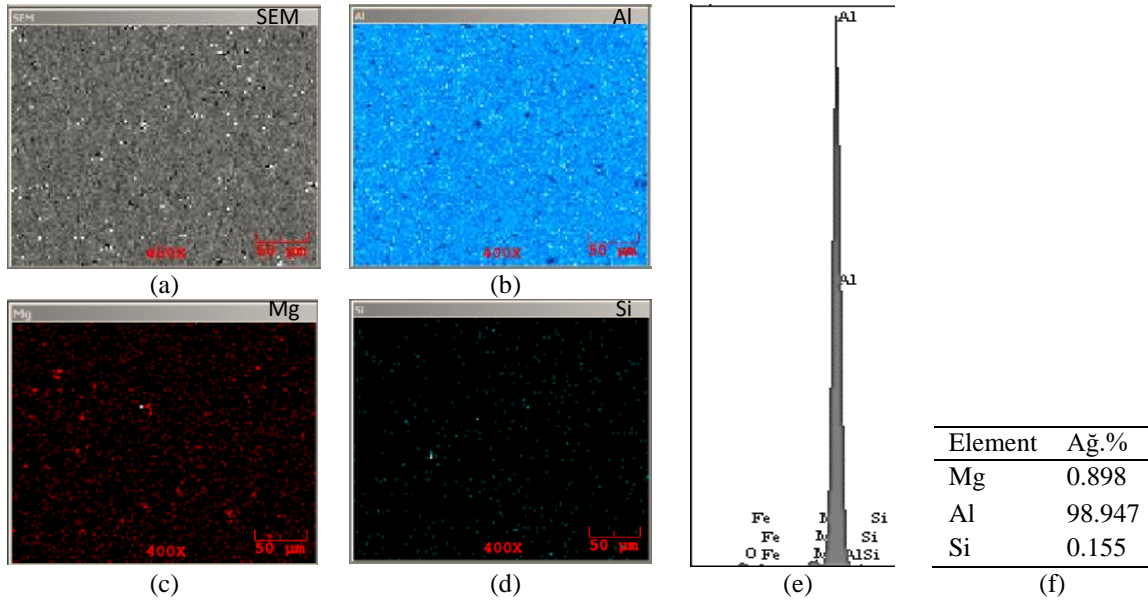
Şekil 20. 1.2 kodlu numunenin EDS analizi ve elementel haritalaması

Birinci TIG kaynağı tamiratındaki elementel dağılıma göre, mukavemet artırıcı Mg'nin kaynak tamiratu yapılmayan numuneye göre azaldığı görülmektedir.



Şekil 21. 3.1 kodlu numunenin EDS analizi ve elementel haritalaması

Üçüncü MIG kaynağı tamiratındaki elementel dağılıma göre, mukavemet artırıcı Mg'nin artan ısı girdisiyle beraber birinci MIG kaynağı tamiratına göre azaldığı görülmektedir. Artan ısı girdisinin  $Mg_2Si$  çökeltilerinin çözünmesine neden olduğu düşünülmektedir. Üçüncü TIG kaynağı tamiratındaki elementel dağılıma göre, mukavemet artırıcı Mg'nin artan ısı girdisiyle beraber birinci TIG kaynağı tamiratına göre daha da azaldığı görülmektedir. TIG kaynağı tamiratında ısı girdisi MIG kaynağına göre daha fazla olduğundan Mg'nin TIG kaynağında daha fazla çözülmeye uğradığı tespit edilmiştir. Bu durum çekme mukavemetlerinde değişimle benzerlik göstermektedir.



Şekil 22. 3.2 kodlu numunenin EDS analizi ve elemental haritalaması

#### 4. SONUÇ

4mm kalınlığındaki 6061 serisi alüminyum levhalar MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. MIG kaynak yapılmış numuneler taşlanarak 1., 2., ve 3. tamirat şeklinde hem MIG hem de TIG kaynağı ile onarımları gerçekleştirilmiştir. Numunelerin tahribatsız testleri, makroyapı-mikroyapı incelemeleri, mekanik testleri, XRD ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.

- Gözle muayene sonuçlarına göre kaynakta herhangi bir probleme rastlanmamıştır. Kaynak kep ve kök yükseklikleri kabul seviyesindedir. Kaynak işleminin yerine göre mukavemetli değil de görsel olarak da kabul görmesi istenilen yerlerde TIG kaynağı bir adım öne geçmektedir. Penetrant muayene sonuçlarına göre MIG kaynağında tamirat sayısı arttıkça kaynak yüzeyindeki gözeneklenmenin de arttığı görülmüştür. Radyografik muayene sonuçlarına göre kaynak dikişlerinde herhangi bir süreksizliğe rastlanmamıştır.

- Makro inceleme sonuçlarında gözeneklenmenin daha çok kök bölgesinde olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin kaynak öncesi temizlik işleminin yeteri kadar yapılmamasıdır. Yapılan tamiratlarda gözenek dağılımı ve boyutları kabul kriterlerinin içinde değerlendirilmiştir.

- Mikroyapı görüntülerinde görülen koyu siyah parçacıklar  $Mg_2Si$  taneciklerini temsil etmektedir. Dolgu metali ER5356 olduğundan kaynak yapısının içinde de  $Mg_2Si$  tanecikleri mevcuttur. Isı girdisi arttıkça tane boyutlarında da artış görülmüştür. Tamir sayısı arttıkça ITAB bölgesindeki tanelerde irileşme görülmektedir ve buna bağlı olarak dayanım azalmıştır.

- Ambriz ve arkadaşları tarafından yürütülen bir çalışmada, gaz metal ark kaynağının 6061-T6 üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tipik olarak, ısı girdisi ne kadar yüksek olursa, ITAB'ın mekanik özellikleri o kadar düşük olmaktadır sonucuna varmışlardır (Ambriz ve ark., 2009). Uygulanan tamir işlemleri ve mekanik mukavemet testleri doğrultusunda malzemeye tamir işlemi uygulandıkça çekme mukavemetlerinde düşüş görülmüştür. Tablo 7'de kaynak tamiratyyla birlikte akma ve çekme mukavemet değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca tablolardaki veriler incelendiğinde yapılan tamiratlarda MIG kaynağının çekme mukavemetinin TIG kaynağının çekme mukavemetinden daha fazla olduğu görülmüştür. MIG kaynağında en düşük çekme muavemeti 180 MPa, TIG kaynağında ise 175 MPa olarak ölçülmüştür. 3.TIG kaynak tamiri sonucunda çekme mukavemet değeri suni yaşlandırılmış malzeme için kabul kriterlerinin dışına çıkmıştır. Çekme deneyinde bütün kopmalar

ITAB bölgesinde gerçekleşmiştir. 6061 T6 alüminyum alaşımının kaynağında, ısıdan etkilenen bölgelerde mukavemet arttırıcı ( $Mg_2Si$ ) çökeltilerinin çözünmesinin mekanik özelliklerde düşüşe yol açtığı düşünülmektedir. Bu durum literatürdeki çalışmalara benzerlik göstermektedir.

- Isı girdileri MIG kaynağında 214 J/mm, TIG kaynağında ise 285 J/mm civarında hesaplanmıştır. Isı girdisinin daha fazla olmasından ötürü TIG kaynağı ile yapılan tamiratlardan sonra malzemede daha fazla yamulma (distorsiyon, çarpılma) gözlemlenmiştir.

- Sertlik deneyi sonuçlarına göre en yüksek sertlik değerinin ana malzemede, daha sonra kaynak bölgesinde ve en düşük değer de ITAB bölgesinde olduğu görülmüştür. V. Malin tarafından yapılan çalışmada ısıdan etkilenen bölgedeki sertlik değerlerinin ana malzemenin yaklaşık %70'i olduğu gösterilmiştir (Malin, 1995). Mevcut çalışmada ise bu oran birinci MIG kaynağı tamiratında % 82 iken üçüncü MIG tamirinde % 78, üçüncü TIG tamirinde % 76 olarak belirlenmiştir.

- XRD sonuçlarında da alüminyum pikleri ile birlikte  $Mg_2Si$  fazının varlığı tespit edilmiştir. Hirose ve arkadaşları kaynak sırasında, yüksek ısı girdisinin dalgalanması ITAB'da çökeltilerin çözünmesine neden olmaktadır sonucuna varmışlardır (Hirose ve ark., 1999). Mevcut çalışmada da artan ısı girdisiyle  $Mg_2Si$  miktarının azaldığı tespit edilmiştir.

- ITAB bölgelerinden alınan EDS analizi ve haritalama sonuçlarına göre artan tamirat sayısı ve ısı girdisiyle paralel olarak Mg miktarında düşüş görülmüştür. Çekme dayanımlarının da bu durumla ilişkili olarak azaldığı düşünülmektedir.

## 5. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## 6. YAZAR KATKISI

Mustafa ARSLAN ve Nil TOPLAN çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin eleştirel incelenmesi ve son onay ve tam sorumluluk kısmında katkıda bulunmuştur.

## 7. KAYNAKLAR

- Akman A.B., Raylı Sistem Araçları İmalatında Kullanılan 6061 ve 5083 Alaşımının TIG ve MIG Kaynaklarının Tahribatlı ve Tahribatsız Muayene Yöntemleriyle Karşılaştırılması, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış), 2018.
- Ambriz R.R., Barrera G., Garcia R., Lopez V.H., A Comparative Study of the Mechanical Properties of 6061-T6 GMA Welds Obtained by the Indirect Electric Arc (IEA) and the Modified Indirect Electric Arc (MIEA). *Materials and Design* 30 (7), 2446-2453, 2009.
- Bhatia A., Introduction to Welding and NonDestructive Testing (NDT), [https://www.cedengineering.com/userfiles/Introduction%20to%20Welding%20&%20Non-Destructive%20Testing%20\(NDT\)%20-%20R1.pdf/](https://www.cedengineering.com/userfiles/Introduction%20to%20Welding%20&%20Non-Destructive%20Testing%20(NDT)%20-%20R1.pdf/) (Erişim Tarihi: 07.03.2023).
- Çüngür R., Kaynaklı ve Kaynaksız 5754 Alüminyum Alaşımının Korozif Ortamlardaki Çekme Davranışı, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış), 2021.

- Debeski M.A.M., The Effect of Different Additional Wires on the Microstructure and Mechanical Properties of AISI 304L and AISI 430 Stainless Steels Combined with TIG Welding, Karabük University Graduate School of Natural and Applied Science, Master Thesis (Printed), 2017.
- Gönül E., Kaynaklı İmalatta Tahribatsız Muayene Ve Tahribatsız Muayene Metotları, [https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/users/zeynep/NDT%20METHODS%20FOR%20WELDING\\_Rev02.pdf/](https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/users/zeynep/NDT%20METHODS%20FOR%20WELDING_Rev02.pdf/) (Erişim Tarihi: 07.03.2023).
- Hirose A., Kurosawa N., Kobayashi K.F., Todaka H., Yamaoka H., Quantitative Evaluation of Softened Regions in Weld Heat-Affected Zones of 6061-T6 Aluminum Alloy-Characterizing of the Laser Beam Welding Process. *Metallurgical and Materials Transactions A* 30, 2115-2120, 1999.
- Kamat S.K., Kumar A., An Experimental Investigation of Mechanical Properties of Al 6106 T6 Alloy Joined by Friction Stir Welding and TIG Welding. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology* 3 (1), 246–253, 2013.
- Khafaji L.A., The Effect of Welding Methods in the Weldment Design on the Distortions, Hardness and Stresses Generation of Steel Type S355J2C+N, Türk Hava Kurumu University Graduate School of Natural and Applied Science, Doctoral Thesis (Printed), 2020.
- Kocaman A.G., Demirer A., AA6061 T6 Alüminyum Alaşımında Bilyeli Dövme İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Dergisi* 4 (2), 49-58, 2021.
- Kumar P., Arif A., Prasad A.C.V.S., Danaiah P., Singh A.K., Patro M., Kishore K.S., Murugan M., Study of Welding Process Parameter in TIG Joining of Aluminum Alloy (6061). *Materials Today: Proceedings* 47 (13), 4020-4025, 2021.
- Malin V., Study of Metallurgical Phenomena in the HAZ of 6061-T6 Aluminum Welded Joints. *Welding Journal* 305-318, 1995.
- Okay S., Investigation of Mechanical Property Changes After MIG Welding of (7XXX) Series Aluminum Alloys, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master Thesis (Printed), 2016.
- Prakash J., Tewari S.P., Srivastava B.K., Shielding Gas For Welding of Aluminium Alloys by TIG/MIG Welding A Review. *International Journal of Modern Engineering Research* 1 (2), 690-699, 2012.
- Singh L., Singh R., Singh N.K., Singh D., Singh P., An Evaluation of TIG Welding Parametric Influence on Tensile Strength of 5083 Aluminium Alloy. *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering* 7 (11), 1262–1265, 2013.
- Withers P.J., Residual Stress and Its Role in Failure. *Reports on Progress in Physics* 70, 2211-2264, 2007.