



Arasturma Makaleleri / Research Articles	Sıra No
<b>Aysegül GÜLTEKİN TOROSLU</b> Geri Dönüşümlü Akriilonitril Bütadiyen Stiren (ABS) Plastik Malzemesinin Kalıplama Parametrelerine Etkisi Effect of Recycled Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Plastic Material on Moldability .....1-6	1-6
<b>Faruk SERİN, Metin ERTÜRKLER, Mehmet GÜL</b> A Novel Probabilistic Nuclei Segmentation Algorithm for H&E Stained Histopathological Tissue Images H&E ile Boyanmış Histopatolojik Dokü İmgeleri için Yeni Bir Olasılıksal Hücre Çıkarıcı Bölütleme Algoritması .....7-17	7-17
<b>İsmail KILIÇ, Kanat Burak BOZDOĞAN, Süleyman AYDIN, Saadet Gülçe GÖK, Safiye GÜNDOĞAN</b> Kule Tipi Yapıların Dinamik Davranışının Belirlenmesi: Kırklareli Hızırbey Camii Minaresi Örneği Determination of Dynamic Behaviour of Tower Type Structures: The Case of Kırklareli Hızırbey Mosque Minaret .....19-26	19-26
<b>Burak ÖZTÜRK, Özkan KÜÇÜK</b> Bakır ve Pirinç Talasları ile Takviye Edilmiş Boru Bağlantı Elemanlarının İki Farklı Üretim Türü için (SEC) Özel Enerji Tüketim Modeli Specific Energy Consumption (SEC) Model For Types of Two Different Production of Fittings Which Is Reinforced by Chips of Copper And Brass .....27-35	27-35
<b>Kadir GÖK, Arif GÖK</b> Ostempereleme İşleminin CBN Kesici Takım Gerilmeleri Üzerindeki Etkisinin Nümerik Simülasyonu Numeric Simulation of Effect on The CBN Cutting Tool Stresses of Austempering Process .....37-44	37-44
<b>İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ</b> The Influence of Axial Compression on The Free Vibration Frequencies of Cross-Ply Laminated and Moderately Thick Cylinders Eksenel Basıncın Dik-Katmanlı ve Orta Kalınlıkta Silindirelerin Serbest Titreşim Frekanslarına Etkisi .....45-52	45-52
<b>Arcan YANIK, Christopher HIGGINS</b> A Monte-Carlo Simulation for The Estimation of Side-By-Side Loading Events on Oregon Bridges Oregon Köprülerinde Yan-Yana Araya Yıkılmalarının Tahmini için Bir Monte Carlo Simülasyonu .....53-60	53-60
<b>H. Süleyman GÖKÇE, Hojjat HOSSSEINNEZHAD, Omur ÜZÜM, Daniel HATUNGIMANA, Kambiz RAMYAR</b> Optimising High Lime Fly Ash Content By Means of Silica Fume Incorporation to Control Alkali-Silica Reaction and Drying Shrinkage of Mortars Harçların Alkali-Silis Reaksiyonu ve Kuruma Büzülmesini Kontrol Etmek için Silis Dumanı İkamesi ile Yüksek Kirece Sahip Uçucu Külün İçeriğinin Optimizasyonu .....61-66	61-66
<b>Ömer KASIM</b> Malicious Xss Code Detection With Decision Tree .....67-72	67-72
<b>Mustafa GÜNAY, Süleyman GÜNDÜZ, Hakan YILMAZ, Nafiz YAŞAR, Ramazan KAÇAR</b> PLA Esaslı Numunelerde Çekme Dayanımı için 3D Baskı İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu Optimization of 3D Printing Operation Parameters for Tensile Strength in PLA Based Sample .....73-79	73-79
<b>Talip ÇELİK, Yasin KİŞİOĞLU</b> Kalça Protezi Stabilitésinin Harmonik Cevap Analizi ile Değerlendirilmesi Evaluation of Hip Prosthesis Stability Via Harmonic Response Analysis .....81-84	81-84
<b>Emine EHFNEBATI, İsmail EKMEKÇİ</b> A Study on Shopping Malls Performance Criterias Analysis Using AHP Method AHP Yöntemi Kullanarak Alışveriş Merkezleri Performans Kriterleri Analizi Üzerine Bir Çalışma .....85-95	85-95
<b>İsmail YILDIZ, İbrahim GÜNEŞ</b> Borlanmış % 5 Mg Katkılı Ni-Mg Alaşımının Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi Investigation of Surface Properties of Boronized Ni-Mg Alloy Added 5% Mg .....97-104	97-104
<b>Sedat İLHAN</b> Kullanılmış Ni-Mo Hidrodesülfürizasyon Katalizöründen Nikel Okzalat Dihidrat Üretimi Production of Nickel Oxalate Dihydrate From Spent Ni-Mo Hydrodesulfurization Catalyst .....105-110	105-110
<b>Zekeriya GİRGIN, Faruk Emre AYVAL, Hüseyin BAYRAKÇEKEN</b> Large Deflection Analysis of Prismatic Cantilever Beam Comparatively by Using Combining Method and Iterative DQM Birişim Metodu ve İteratif DQM ile Prizmatik Ankastrde Kirişlerde Karşılaştırılmalı Büyük Şehim Analizi .....111-120	111-120
<b>Abdulaziz S. ALABOODI</b> Experimental and Finite Element Methods Prediction of 3D Printed Material Mechanical Properties With Various Porosity Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemleri 3D Baskılı Malzemenin Çeşitli Gözeneklilik ile Öngörülmesi .....121-127	121-127
<b>Fatih EKİNCİ, Mustafa Hicabi BÖLÜKDEMİR</b> Baş Plaka Fantomunda Kullanılan Biyomalzemelerde Oluşan İkinci Pikin Proton Bragg Pikine Etkisi The Effect of the Second Peak Formed in Biomaterials Used in A Slab Head Phantom on The Proton Bragg Peak .....129-136	129-136
<b>Zekeriya DABAN, Ertuğrul DURAK</b> Manyetik Alana Maruz Tor Metalurjisiyle (TM) Üretilmiş Bronz Yataklarda Sürtünme Özelliklerinin İncelenmesi Investigation of Frictional Properties of Manufactured by Powder Metallurgy (P/M) The Bronze Bearings Exposed to Magnetic Field .....137-149	137-149
<b>Kadir GÖK, Sermet İNAL, Arif GÖK</b> Biomechanical Effects of Four Different Configurations in Salter Harris Type 4 Distal Femoral Epiphyseal Fractures Salter Harris Tip 4 Distal Femoral Epifiz Kırıklarında Dört Farklı Konfigürasyonun Biyomekanik Etkileri .....151-159	151-159
<b>İbrahim BİLİZ, Adem BAKKALOĞLU, Musa KILIÇ</b> The Effect of Process Parameters on Microstructure and Porosity of Layered Nial(Co/Cr) Alloy Produced by SHS Method SHS Yöntemiyle Üretilen Tabakalı Nial(Co/Cr) Alaşımının Mikroyapı ve Gözenek Oranına İşlem Parametrelerinin Etkisi .....161-169	161-169
<b>Cenk DALIOĞLU</b> İnsan Kolon Kanseri Hücrelerine Karşı İnorganik Nanopartikül-Temelli İlaç Taşıyıcı Sistemlerin Kullanılması: Partikül Büyüklüğünün Antikanser Aktivitesine Etkisi Using Inorganic Nanoparticle-Based Drug Delivery Systems Against Human Colon Cancer Cells: Effect of Particle Size on Anticancer Activity .....171-179	171-179
<b>Yıldız KOÇ, Hüseyin YAĞLI</b> İsı-Güç Kombine Sistemlerinde Kullanılan Kalına Çevriminin Enerji ve Ekserji Analizi Energy And Exergy Analysis of A Kalına Cycle Used for Combined Heat-Power Systems .....181-188	181-188
<b>Mehmet Alper SOFUDOĞLU</b> Fuzzy Applications of FUCOM Method in Manufacturing Environment Üretim Ortamında FUCOM Yönteminin Bulanık Uygulamaları .....189-195	189-195
<b>Onur ARSLAN</b> A Finite Element Procedure for Sliding Contact Problems Involving Heterogeneous Coefficient of Friction Heterojen Sürtünme Katsayılı Kayma Temas Problemleri için Bir Sonlu Elemanlar Çözümü .....197-205	197-205
<b>Mustafa ALTIN, Ahmet KAZAN, H. Bayram KARADAĞ</b> Monge Hypersurfaces in Euclidean 4-Space With Density Yoğunluklu Ökildiyen 4-Uzayında Monge Hiperyüzeyleri .....207-214	207-214
<b>Nursal ARICI, Ahi İSKENDER</b> Fotovoltaik Güneş Santrallerinde Şebeke Bağlantı Sorunları ve Çözümleri Problems And Solutions of Grid-Connected in Photovoltaic Solar Plants .....215-222	215-222
<b>Adem DALCALI, EROL KURT, Emre ÇELİK, Nihat ÖZTÜRK</b> Cogging Torque Minimization Using Skewed and Separated Magnet Geometries Çarpık ve Parçalı Miknats Geometrileri Kullanarak Vuruntu Torku Minimizasyonu .....223-230	223-230
<b>Fatma Zeynep AYTAÇ, Nuri YÜCEL</b> Development of A Design Methodology for A Centrifugal Compressor With The Utilization of CFD Radyal Bir Kompresör için HAD Yardımıyla Tasarım Metodolojisi Geliştirilmesi .....231-239	231-239
<b>Cuma KILINÇ, Ümit İSKENDER</b> Yüksek Sıcaklık Fırınlarının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Modellenmesi .....241-247	241-247
<b>Metin YURDDAŞKAL, Uğur KARTAL, Eyyüp Can DOLUEL</b> Titanyum Dioksit İndirgenmiş Grafen Oksit Kompozitlerin Üretimi ve Fotokatalitik Özelliklerinin İncelenmesi Production of Titanium Dioxide/Reduced Graphene Oxide Composites and Investigation of Their Photocatalytic Properties .....249-255	249-255

# POLİTEKNİK DERGİSİ

## Journal of Polytechnic

# POLİTEKNİK DERGİSİ



# Politeknik Dergisi

## Journal of Polytechnic

Sahibi / Owner  
**Prof. Dr. İbrahim USLAN**  
Rektör / Rector

Yayın Yönetmeni / Publishing Manager  
**Prof. Dr. Süleyman TEKELİ**  
Dekan / Dean

Editör Yardımcısı / Associate Editor  
**Doç. Dr. M. Tolga ÖZKAN**  
Gazi Üniversitesi / Gazi University

Editör / Editor  
**Prof. Dr. Adnan SÖZEN**  
Gazi Üniversitesi / Gazi University

Editör Asistanı / Assistant Editor  
**Doç. Dr. Serhat KARYEYEN**  
Gazi Üniversitesi / Gazi University

### YARDIMCI EDİTÖRLER/ASSOCIATE EDITORS

**Prof. Dr. Jose Manuel LOPEZ-GUEDE**, University of the Basque Country  
**Prof Sanjeevikumar PADMANABAN**, University of Johannesburg  
**Prof. Dr. Josep M. GUERRERO**, Aalborg University  
**Prof. Dr. Hacı Bayram KARADAĞ**, İnönü Üniversitesi  
**Prof. Dr. İhsan ALP**, Gazi Üniversitesi  
**Prof. Dr. Hilal KURT**, Gazi Üniversitesi  
**Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ**, Çankırı Karatekin Üniversitesi  
**Prof. Dr. Figen BALO**, Fırat Üniversitesi  
**Prof. Dr. Zafer TEKİNER**, Gazi Üniversitesi  
**Prof. Dr. Hakan KESKİN**, Gazi Üniversitesi  
**Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU**, Gazi Üniversitesi  
**Prof. Dr. Murat YÜCEL**, Gazi Üniversitesi  
**Doç. Dr. Bünyamin CİYLAN**, Gazi Üniversitesi  
**Doç. Dr. Mustafa ÖZER**, Gazi Üniversitesi  
**Doç. Dr. Hamit SOLMAZ**, Gazi Üniversitesi  
**Doç. Dr. Hülya DURMUŞ**, Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
**Dr. Öğr. Üyesi Kasım SERBEST**, Sakarya Üniversitesi  
**Dr. Öğr. Üyesi Amjad ANVARI-MOGHADDAM**, Aalborg University

### YAYIN DANIŞMA KURULU/EDITORIAL ADVISORY BOARD

<b>Abid ABU-TAIR</b> , Berzeit University	<b>Murat HOŞÖZ</b> , Kocaeli Üniversitesi
<b>Adel NASİRİ</b> , University of Wisconsin Milwaukee	<b>Musa ATAR</b> , Gazi Üniversitesi
<b>Ali Kemal YAKUT</b> , Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	<b>Mustafa AKTAŞ</b> , Gazi Üniversitesi
<b>Arcan DEREÇİOĞLU</b> , Orta Doğu Teknik Üniversitesi	<b>Myung Hyun KİM</b> , Kyung Hee University
<b>Arif WANI</b> , California State University	<b>Nadire Şule ATILGAN</b> , Hacettepe Üniversitesi
<b>Ayhan ÖZÇİFTÇİ</b> , Aksaray Üniversitesi	<b>Nizamettin KAHRAMAN</b> , Karabük Üniversitesi
<b>Bekir Sami YILBAŞ</b> , King Fahd University	<b>Nobumasa MATSUI</b> , Nagasaki University
<b>Dilek KUMLUTAŞ</b> , Dokuz Eylül Üniversitesi	<b>Nusret AS</b> , İstanbul Üniversitesi
<b>Engin ÖZDEMİR</b> , Kocaeli Üniversitesi	<b>Oğuz TURGUT</b> , Gazi Üniversitesi
<b>Erol ARCAKLIOĞLU</b> , Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi	<b>Osman İSIKAN</b> , Marmara Üniversitesi
<b>Farzollah MIRZAPOUR</b> , University of Zanjan	<b>Peter LUND</b> , Helsinki University of Technology
<b>Hakan YAVUZ</b> , Çukurova Üniversitesi	<b>Ramazan BAYINDIR</b> , Gazi Üniversitesi
<b>Hamit SARUHAN</b> , Düzce Üniversitesi	<b>Ramazan KÖSE</b> , Dumlupınar Üniversitesi
<b>Hani H.W.SAIT</b> , King Abdulaziz University	<b>Ramazan YILMAZ</b> , Sakarya Üniversitesi
<b>Henryka Danuta STRYCZEWSKA</b> , Politechnika Lubelska	<b>Recep ÇALIN</b> , Kırıkkale Üniversitesi
<b>Hüseyin AKILLI</b> , Çukurova Üniversitesi	<b>Recep YAMANKARADENİZ</b> , Bursa Uludağ Üniversitesi
<b>Hüseyin Rıza BÖRKLÜ</b> , Gazi Üniversitesi	<b>Rodica MILICI</b> , Stefan cel Mare Suceava University
<b>İbrahim DİNÇER</b> , University of Ontario, Institute of Technology	<b>Saffa B. RIFFAT</b> , Nottingham University
<b>İbrahim SEFA</b> , Gazi Üniversitesi	<b>Sare SAHİL</b> , Gazi Üniversitesi
<b>İhsan KORKUT</b> , Gazi Üniversitesi	<b>Saw Sor HEOH</b> , INTI International University
<b>İlhami ÇOLAK</b> , İstanbul Gelişim Üniversitesi	<b>Sing LEE</b> , Institute for Plasma Focus
<b>İlker USTA</b> , Hacettepe Üniversitesi	<b>Souad A.M.ALBATHI</b> , International Islamic University of Malaysia
<b>İshak KARAKAYA</b> , Orta Doğu Teknik Üniversitesi	<b>Tayfun MENLİK</b> , Gazi Üniversitesi
<b>Jamal KHATIB</b> , University of Wolverhampton	<b>Turgay AKBULUT</b> , İstanbul Üniversitesi
<b>Jerzy SMARDZEWSKI</b> , Ponzan University	<b>Ulvi ŞEKER</b> , Gazi Üniversitesi
<b>John KINUTHIA</b> , University of South Wales	<b>Yasin VAROL</b> , Fırat Üniversitesi
<b>Mahmood GHORANNEUISS</b> , Azad University	<b>Yılmaz ARUNTAŞ</b> , Gazi Üniversitesi
<b>Metin GÜRÜ</b> , Gazi Üniversitesi	<b>Yunus ÇENGEL</b> , Nevada Üniversitesi
<b>Metin İPEK</b> , Sakarya Üniversitesi	

<b>Cilt / Volume : 23</b>	<b>Sayı / Issue : 1</b>	<b>Mart / March : 2020</b>
<p>Politeknik Dergisi Gazi Üniversitesi tarafından yılda <b>dört sayı</b> olarak yayınlanmaktadır / Journal of Polytechnic has been published <b>four issues</b> per year by Gazi University</p>		

<b>BU SAYIYA (CİLT 23 SAYI 1) KATKI VEREN HAKEMLER (REVIEWERS)</b>	
Abdullah KURT	İLKER Bekir TOPÇU
Abdulmecit GÜLDAŞ	İnan ÜNAL
Abdurahman KARABULUT	Kadir ÇAVDAR
Adnan SÖZEN (4 kez)	Korkmaz YILDIRIM
Ahmet ÖZDEMİR	Kubilay AKÇAÖZOĞLU
Ahmet ÖZTEL	Kurtuluş BORAN
Ali DEMİR	Kürşad SEZER
Ataollah KHANLARI	Mahmut İZCİLER
Ayhan TUTAR	Mansur SÜMER
Ayşe DEMİRHAN	Mehmet AVCAR
Azım GÖKÇE	Mehmet Selçuk MERT
Barış SAYIN	Menderes KAM
Burhan ATEŞ	Merve ŞENTÜRK ACAR
Çetin KARATAŞ	Mustafa EROL
Derya DIŞPINAR	Mustafa GÜNAY
Dinçer YEĞEN	Mustafa KAYA
Emin SÜNBÜLOĞLU	Necaattin BARIŞCI (2 kez)
Engin NAS	Ömer KASIM
Engin TAN	Özay AKDEMİR
Ertuğ AYDIN	Recep GÜNEŞ
Fatih KORKMAZ	Recep Onur UZUN
Fethullah GÜNEŞ	Sami ACAR
Gökçe HAPÇIAĞAOĞLU	Serap ŞAHİN BÖLÜKBAŞI
Hakan GÖKDAĞ	Serdar MSG
Hamit AKBULUT	Tayfun MENLİK
Hasan Basri BAŞAĞA	Tayfun UYGUNOĞLU
HASAN YILDIZ	Volkan Soner ÖZSOY
Hayati MAMUR	Yunus KAYIR
Hüdayim BAŞAK	Zafer TEKİNER (4 kez)
İhsan KORKUT (2 kez)	Zahide Bayer ÖZTÜRK
İhsan TOKTAŞ	
<b>Yazışma Adresi / Correspondence Address :</b>	
<p>Politeknik Dergisi Editörlüğü Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Tanıtım ve Yayın Müdürlüğü 06500 Teknikokullar ANKARA –TÜRKİYE</p>	
<p><b>Tel :</b> 0312-202 34 12 <b>Fax :</b> 0312-212 00 59 <b>Elektronik Posta Adresi / e-mail :</b> politeknik@gazi.edu.tr</p>	
<p>Teknik Sorumlu / Technical Manager: <b>Erdem ÇİFTÇİ</b></p> <p>Dizgi / Compositor: <b>İdris ÖZÇELİK</b></p>	
<b>e - ISSN : 2147-9429</b>	



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Geri dönüşümlü Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS) plastik malzemesinin kalıplama parametrelerine etkisi

*Effect of recycled Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) plastic material on moldability*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Ayşegül GÜLTEKİN TOROSLU

*ORCID:* 0000-0002-7380-3109

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Gültekin Toroslu A., “Geri dönüşümlü Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS) plastik malzemesinin kalıplama parametrelerine etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 1-6, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.501800

# Geri Dönüşümlü Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS) Plastik Malzemesinin Kalıplama Parametrelerine Etkisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Ayşegül GÜLTEKİN TOROSLU\***

Millî Eğitim Bakanlığı Hayat Boyu Öğrenme Genel Müdürlüğü, Türkiye

(Geliş/Received : 24.12.2018 ; Kabul/Accepted : 06.02.2019 )

## ÖZ

Geri dönüşüm esnasında plastik malzemelere karışan yabancı maddeleri ayırtmak zor ve maliyetli bir işittir. Yağ, kir, metal partikülleri ve boya gibi yabancı maddeler plastik ürünler kullanılırken ince bir tabaka halinde plastik malzemeye karışırlar. Birçok uygulamada geri dönüşümlü malzeme kullanımının ürün üzerinde etkisinin fazla olduğuna inanılır. Plastik malzemenin enjeksiyon makinasında tekrar eritilerek basılması esnasında yağ ve kir sıcaklığın etkisi ile ayrışırlar. Bakır, özellikle elektronik ve otomotiv sektöründe plastik malzemelere en yaygın karışım yapan malzemedir. Bu çalışmada, bakır partikülleri %1, %3, %5, %7 oranlarında karıştırılmış geri dönüşümlü Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS) plastik malzemesinin fiziksel özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bakır partüküllü geri dönüşümlü ABS malzemesi ile ilk kez kullanılan ABS malzemesinin gerinim, darbe, akış indeksi, termal ve elektrik iletkenliği özellikleri araştırılmıştır. Sonuç olarak %3 oranına kadar bakır partükülü karışım malzemenin fiziksel ve kalıplanabilirlik özelliklerine etkisinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Akrilonitril bütadiyen stiren, geri dönüşüm, bakır partikülleri, kalıplanabilirlik.

## Effect of Recycled Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Plastic Material on Moldability

### ABSTRACT

It is difficult and costly to disassemble impurities in plastic materials during recycling. Foreign materials such as oil, dirt, metal particles and paint are mixed into a thin layer of plastic when using plastic products. The use of recyclable materials in many applications is believed to have a greater impact on the product. During the re-melting of the plastic material on the injection machine, the oil and dirt are separated by the effect of temperature. Copper, especially in the electronics and automotive industry, is the most common material for plastic materials. In this study, the effect of copper particles %1, 3%, 5%, 7% and mixed recycled Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) on the physical properties of plastic material was investigated. The properties of ABS which is used for the first time with copper particulate recycled ABS material are investigated for strain, impact, flow index properties, thermal and electrical conductivity. As a result, it has been observed that the effect of physical and moldability properties of the mixture of copper particles up to 3% is within acceptable limits.

**Keywords:** Akrilonitril bütadiyen stiren, recycle, copper particular, moldability.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde plastik, yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Kullanılmış plastiklerin tekrar kullanılması çevre kirliliğini azaltacağı gibi ekonomik katkı sağlayacaktır. Bu yüzden evlerden plastik atıklar ayrı olarak toplanarak ekonomiye katılmaktadır. Plastik malzemelerin kullanılması sırasında toz, kir, yağ, boya ve metal parçacıklarıyla kirlendiği ve karışıma uğradığı görülmektedir. Bu karışımlar plastik malzemenin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu karışımların plastiğin özelliklerini ne kadar etkilediği ve mekanik özelliklerinde bir değişimin olup olmadığı araştırma konusudur. Geri dönüşümlü plastiklerin kullanılmasındaki en büyük maliyet karışımların temizlenmesinde harcanır. Bu işlemdeki bir kazanç geri dönüşümün maliyetini önemli derecede düşürür.

Bu alandaki çalışmalara bakıldığında plastik malzemelere farklı malzemeler katılarak elde edilen kompozit malzemelerin özellikleri daha çok araştırma konusu olduğu görülmektedir. Diğer çalışmalarda ise plastik malzemesine katılan katkı maddelerinin plastik malzemesinin fiziksel özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Metalik partüküller kullanılarak plastik malzemelerin özelliklerini geliştirme çalışmalarının literatür de yaygın çalışmalar olduğu görülmektedir [1-11]. Bu çalışmalarda plastik malzemelerin genellikle elektrik ve termal iletkenliğinin artırılması için çalışılmıştır. Plastik malzemelerin termal ve elektrik iletkenlikleri artırılarak alüminyum ve krom kaplanabilirlik özellikleri artırılmıştır. Çalışmalarda plastik malzemelerin elektrik ve termal iletkenlikleri artırılırken gerinim-uzama ve viskozitenin azaldığı görülmektedir.

Plastik malzemelere yüksek oranlarda katkı maddeleri eklenerek kompozit malzemeler üretilerek bu malzemelerin özelliklerinin çalışıldığı birçok çalışmaya

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : agultekintoroslu@gmail.com

da literatürde rastlanmaktadır [12-19]. Bu çalışmalarda kalsit, ağaç tozu, ve metalik parçalar kullanılmıştır. Bu çalışmalarda karışım oranlarının ve katkı maddelerinin homojen dağılımı kompozit malzemesinin fiziksel özelliklerini direk etkilediği görülmüştür. Enjeksiyon yöntemiyle üretim de kompozit malzemelerin viskozite azalması nedeniyle zorluklar yaşandığı görülmektedir.

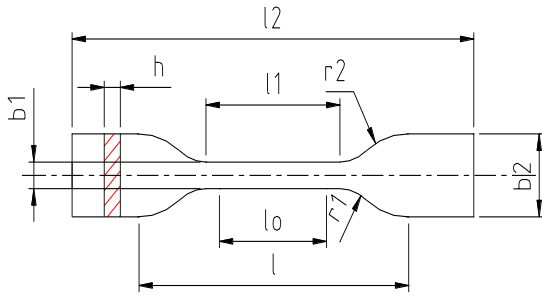
Geri dönüşümlü malzeme kullanılarak enjeksiyon parametreleri ve viskozite çalışmalarının da literatürde oldukça fazla olduğu görülmektedir. Geri dönüşümlü malzemelerin %20-25 oranlarında ham malzemeye katılarak kalıplama özellikleri ve fiziksel özellikler incelenmiştir [20-24]. Fakat geri dönüşümlü malzeme kullanılırken birçok yabancı maddenin de kullanım yerine göre plastik malzemelere karıştığı göz önüne alınarak yapılan çalışmaların az olduğu görülmektedir.

Plastik malzemeler kullanım yerine göre birçok farklı materyaller ile birarada kullanıldıkları için diğer malzemelerin partükülleri plastik malzeme ile karışmaktadır. Geri dönüşüm esnasında da farklı malzemelerin partüküllerini ayırmak oldukça maliyetlidir. Bu çalışmada sadece geri dönüşümlü malzeme kullanılarak fiziksel ve kalıplama özelliklerine bakılmamıştır. Plastik malzemeye karışan partüküllerin geri dönüşümü yapılmadan kullanılabilirliği araştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

### 2.1. Deney Numunesi (Test Sample)

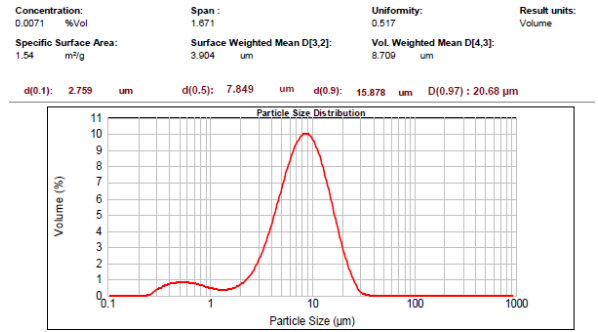
Deney numuneleri LG firmasının Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS) malzemesinden enjeksiyon kalıbı kullanılarak üretilmiştir. Numuneleri ASTM 1238-90 standardına göre hazırlanmıştır (Şekil 1). Numunelere hacimsel olarak sırasıyla %1, %3, %5, %7 oranlarında bakır tozu karıştırılmıştır. Deney numunelerinin ölçüleri Çizelge 1'de ve bakır partüküllerinin tane dağılımı Şekil 2'de verilmiştir. Karışım ekstrüzyon ile homojen olarak karıştırılarak granül hale getirilmiştir. Demag D150 enjeksiyon presi kullanılarak numuneler üretilmiştir.



Şekil 1. Standart deney numunesi (Standard test sample)

Çizelge 1. Deney numunesini ölçüleri 5A (ISO 527-3) (Test sample measurement 5A(ISO 527-3))

Sembol	Standart ölçü (mm)	Numune ölçüsü (mm)
L <sub>2</sub>	≥ 75	75
b <sub>2</sub>	12.5 ± 1	12.5
L <sub>1</sub>	25 ± 1	25
b <sub>1</sub>	4 ± 0.1	4
r <sub>1</sub>	8 ± 0.5	8
r <sub>2</sub>	12.5 ± 1	12.5
L	50+2	50
L <sub>0</sub>	20+0.5	20
h	≥ 2	3



Şekil 2. Bakır tozunun mikron olarak yüzde dağılımı (Micron percentage distribution of copper powder)

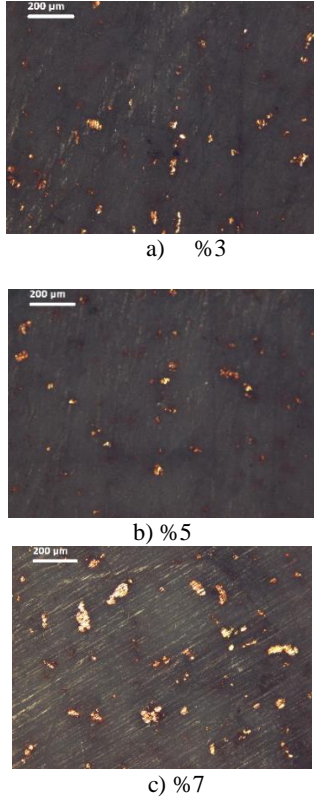
### 2.2. Enjeksiyon Parametreleri (Injection Parameters)

Katkı maddesi arttıkça akışı sağlayabilmek için baskı sıcaklığı ve baskı basıncı artırılmıştır. Bu artışlar baskı esnasındaki numune dolularına göre denemeler yardımıyla bulunmuştur. Deney numunelerinin enjeksiyon kalıbında üretilirken kullanılan enjeksiyon parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir.

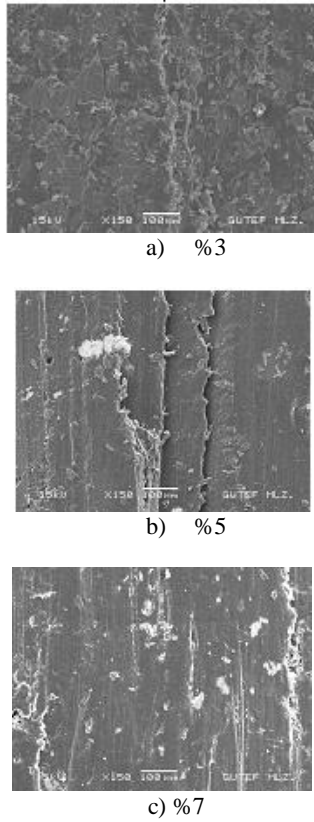
Çizelge 2. Enjeksiyon parametreleri (Injection parameters)

Derece	Basıncı (Bar)	Hız (mm/sn)
230	70	60
235	74	60
240	78	60

Çizelge 2'de verilen enjeksiyon parametreleri kullanılarak üretilen numunelerin kesitlerini incelemek için optik mikroskop ve JEOL JSM -6060 LV SEM mikroskobu kullanılmıştır. Şekil 3'te ve Şekil 4'te verilen optik mikroskop görüntüleri ve SEM görüntülerinden de anlaşılacağı gibi bakır partüküllerinin plastik malzemeye homojen dağıldığı görülmektedir.



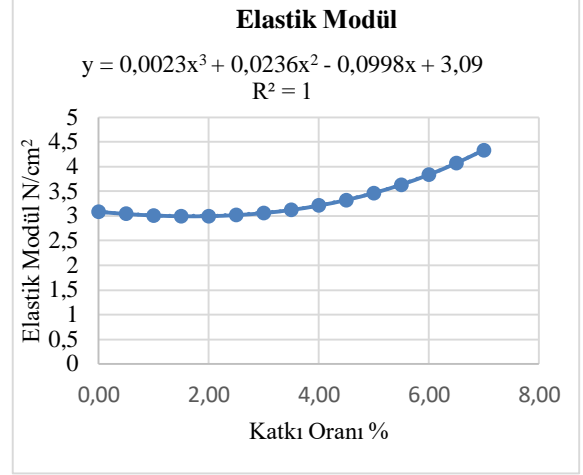
**Şekil 3.** Optik mikroskopta deney numunesi kesit görüntüleri (Cross-sectional views of the test sample an experimental microscope)



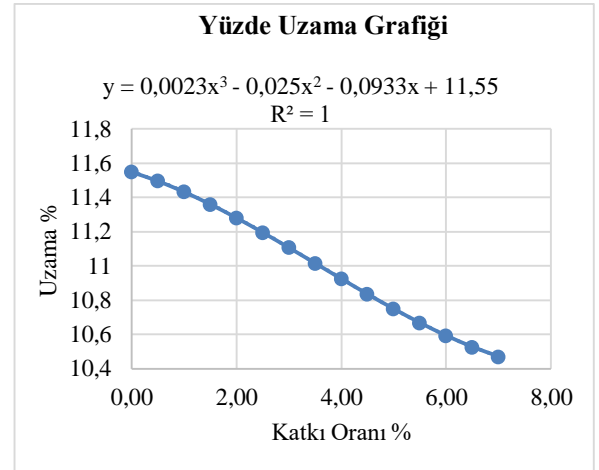
**Şekil 4.** SEM mikroskopta deney numunesi kesit görüntüleri

### 2.3. Çekme Testi (Tensile Test)

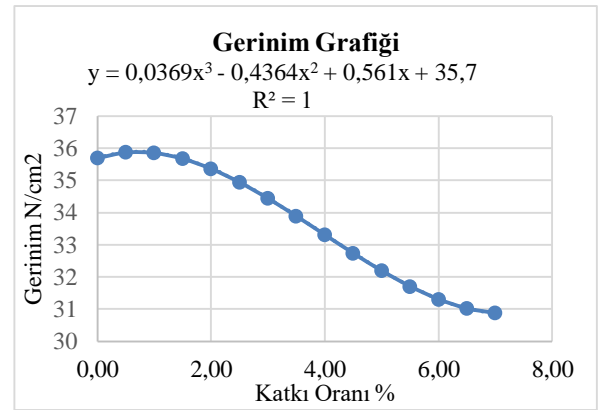
A Shimadzu Autograph tipi çekme test cihazı kullanılmıştır. Ölçümler 25 °C'de ve 5.0 mm/dakika çekme hızında yapılmıştır. Ölçümler beş tekrarlı olarak yapılmış ve ortalama değerleri alınmıştır.



**Şekil 5.** Katkı oranlarına göre elastik modül (Elastic modulus according to additive ratios)



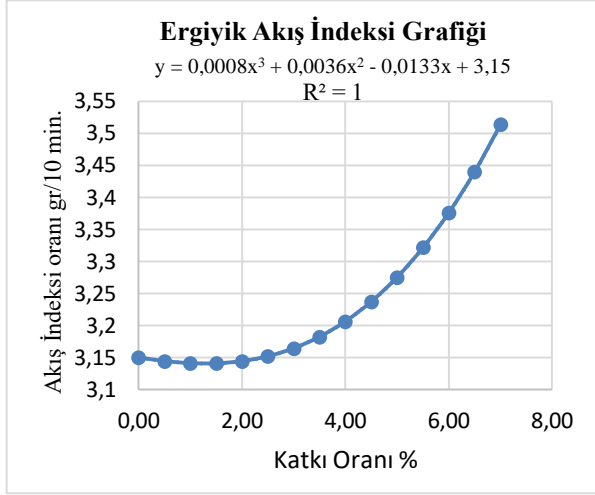
**Şekil 6.** Katkı oranlarına göre yüzde uzama (Strain rate according to contribution rates)



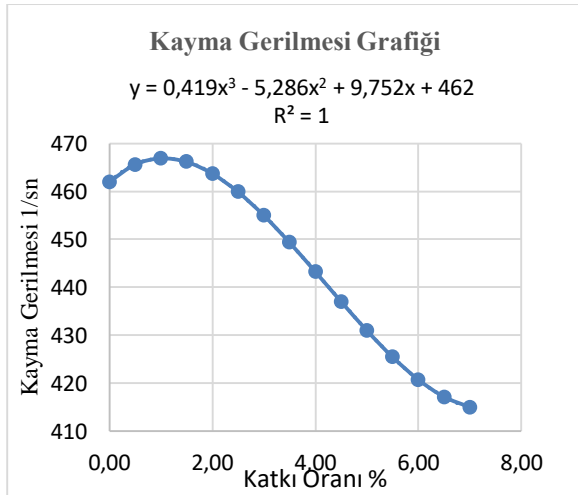
**Şekil 7.** Katkı oranlarına göre gerinim (Stress according to contribution rates)

## 2.4. Akış İndeksi (MFI Melt Flow Index)

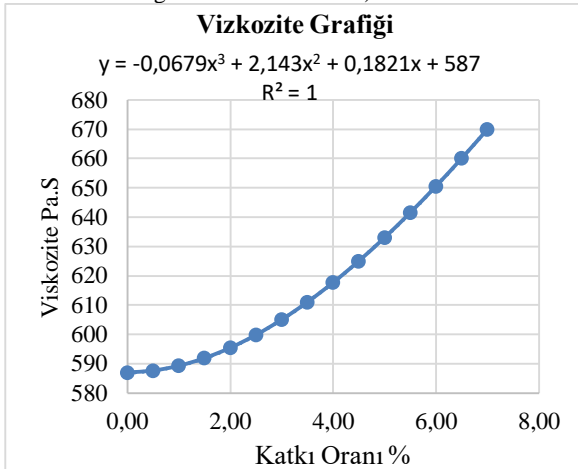
Devanpart model 3180 cihazı kullanılarak ASTM 1238-90 standardına göre yapılan ölçümlerdeki testler 190°C'de ve 2160 g kuvvet uygulanarak yapılmıştır. Her bir bakır katkı oranı için ölçüm 5 kere tekrarlanmıştır.



Şekil 8. Katkı oranlarına göre ergiyik akış indeksi (melt flow index according to the contribution rates)



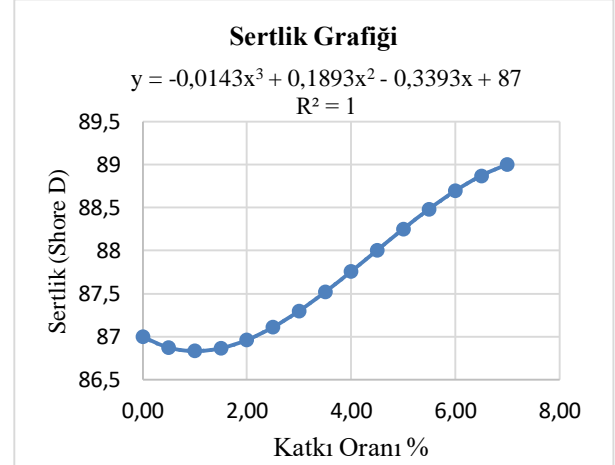
Şekil 9. Katkı oranlarına göre kayma gerilmesi (Shear Rate according to contribution rates)



Şekil 10. Katkı oranlarına göre viskozite (Viscosity according to additive ratios)

## 2.5. Darbe Testi (Charpy impact)

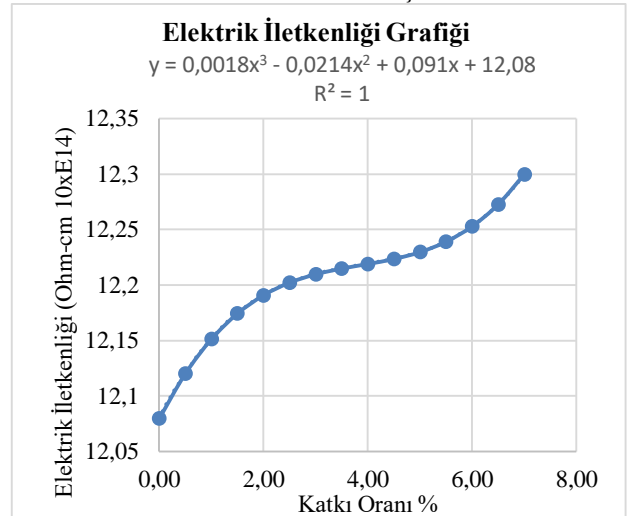
50x4x4 mm karesel numuneler kullanılarak 25°C'de Charpy darbe enerjileri ölçülmüştür. Ölçümler Housfield plastik darbe makinesinde 0.113 kg ağırlık kullanılarak yapılmıştır. Numunelerde 1 mm'lik çentikler vardır. Bu testlerde numuneler kırılmamıştır. Numunelerin sertlik değerleri Shore D ölçü birimine göre ölçülmüştür. Ölçümler aşağıda grafiklerle verilmiştir.



Şekil 11. Katkı oranlarına göre sertlik (Hardness according to the contribution rates)

## 2.6. Elektrik İletkenliği (Electrical Conductivity)

ASTM D-991 standardına göre numunelerden elektrik iletkenlik ölçümleri TR6845 Advantest marka multimetre kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm yapılmadan iyi bir iletkenlik elde etmek için baskı yönündeki sacın altına gümüş pasta sürülmüştür. Bakır elektrot ile plastik numune arasındaki iletkenliğin iyi olması ölçümde sapmanın olmaması için oldukça önemlidir. Numunelerde DC iletkenlik iki kontak noktası kullanılarak ölçülmüştür. Ölçüm değerleri oda sıcaklığında ve numuneye baskı uygulandıktan sonra 2 dakikalık bekleme sonucunda alınmıştır.

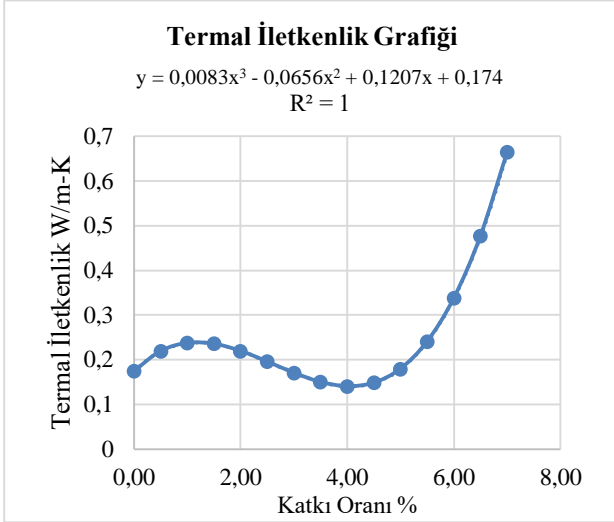


Şekil 12. Katkı oranlarına göre elektrik iletkenliği (Electrical conductivity according to additive ratios)



## 2.7. Termal İletkenlik (Thermal Conductivity)

Numunelerin termal iletkenlik değerleri kısmi tarama yöntemi kullanılarak ve termal iletkenlik testi ise Perkin Elmer DSC test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan cihaz bilgisayar kontrollü olup hesaplamalar cihazın kendi yazılımı olan Pyris programı ile yapılmaktadır. Bütün numunelerin ölçüm yapılmadan önce 20 °C sıcaklıkta olması sağlanmıştır.



Şekil 13. Katkı oranlarına göre termal iletkenlik (Thermal conductivity according to additive ratios)

## 3. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde sonuçların literatürdeki çalışmalar ile benzerlikler gösterdiği ve katkı oranlarının bazı testlerde olumlu etki yaparken diğer testlerde olumsuz etki yaptığı görülmektedir. Bu yüzden testlerdeki değişim miktarları yüzde olarak hesaplanmıştır. Bakır katkılı ABS malzemesinin katkı oranına göre test sonuçlarının nasıl değiştiği Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3'te karşılaştırmalı olarak verilen test sonuçlarına göre metalik katkılı geri dönüşümlü ABS malzemesinin kullanılması bazı testlere olumlu etki yapmaktadır. Özellikle termal iletkenlik ve elektrik iletkenliği özelliklerine olumlu etki yaparken mekanik özelliğine ve akıcılığına etkisi olumsuz olmuştur. Bu etkinin %3 katkı oranına kadar kabul edilebilir sınırlarda olduğu görülmektedir. Bu katkı oranlarında geri dönüşümlü malzemelerin pahalı ayrıştırma işlemleri kullanılmadan kullanılabilmesi görülmektedir. Ayrıca bazı özelliklerinin olumlu yönde artması nedeniyle geri dönüşümlü ABS malzemesinin uygulama yerine göre tercih edilebileceğini de göstermektedir. Fakat Elastik Modül, yüzde uzama ve gerinim özellikleri karşılaştırıldığında geri dönüşümlü ABS malzemesinin % 3 oranından fazla kullanılmasının dezavantaj oluşturacaktır. Ayrıca geri dönüşümlü ABS malzemesinin kullanılması enjeksiyon sıcaklığını ve basıncını arttırdığı görülmüştür. Bu yüzden enerji tüketimi açısından üretim maliyeti daha yüksek olacaktır.

Çizelge 3. Bakır katkılı ABS malzemesinin katkı oranına göre özelliklerinin yüzde değişimi (Percentage change of properties of copper additive ABS)

Testler (% Değişim)	Vol. %1 Katkılı	Vol. %3 Katkılı	Vol. %5 Katkılı	Vol. %7 Katkılı
Elastik Modül	1,8	3,39	11,3	39,53
Yüzde Uzama	2	4,83	7,93	10,33
Gerinim	0,55	4,5	10,8	14,49
Ergiyik Akış İndeksi (Melt Flow Index)	0,54	1,28	2,98	0,54
Kayma Gerilmesi (Shear Rate)	0,06	2,52	7,71	11,18
Viskozite	0,62	2,07	6,84	13,14
Setlik	0,43	0,66	1,19	1,3
Elektrik İletkenliği	0,076	0,24	0,41	0,82
Termal İletkenlik	2,09	2,96	35,7	180,79

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. V Chifor, Z. Tekiner, M. Türker, R Orban, "An Experimental Investigation of Properties of polyethylene Reinforced with Al Powders", *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics Engineering)*, 1-5, 2010.
2. N. Singh, D. Hui, R. Singh, I.P.S. Ahuja, L. Feo, and F. Fraternali, "Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications", *Composites Part B*, 115: 409-422, (2017).
3. Y. Liu, M. Farnsworth, and A. Tiwari, "A review of optimisation techniques used in the composite recycling area: State-of-the-art and steps towards a research agenda", *Journal of Cleaner Production*, 140: 1775-1781, (2017).
4. K.H. Sua, J.H. Lin, and C.C. Lin, "Influence of reprocessing on the mechanical properties and structure of polyamide 6", *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193: 532-538, (2007).
5. N. Feng, X. Wang, and D. Wu, "Surface modification of recycled carbon fiber and its reinforcement effect on nylon 6 composites: Mechanical properties morphology and crystallization behaviors", *Current Applied Physics*, 13: 2038-2050, (2013).
6. Pyrolysis of synthetic polymers and plastic wastes., Kinetic study, J.M. Encinar, J.F. González, *Fuel Processing Technology* 89: 678 - 686, (2008).
7. X. Hua, Y. Guo, L. Chen, X. Wang, L. Li, Y. Wang, "A novel polymeric intumescent flame retardant: Synthesis, thermal degradation mechanism and application in ABS copolymer", *Polymer Degradation and Stability* 97:1772-1778, (2012).
8. D.J. Jung, J. Cheon, and S.J Na, "Effect of surface pre-oxidation on laser assisted joining of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and zinc-coated steel", *Materials and Design* 99: 1-9, (2016).
9. Y. Li, X. Wu, J. Song, J. Li, Q. Shao, N.Cao, N. Lu, and Z. Guo, "Reparation of recycled acrylonitrile- butadiene-

- styrene by pyromellitic dianhydride: Reparation performance evaluation and property analysis”, *Polymer*, 124: 41-47, (2017).
10. A. Arostegui, M. Sarrionandia, and J. Aurrekoetxea, I. Urrutibeascoa, “Effect of dissolution-based recycling on the degradation and the mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer”, *Polymer Degradation and Stability*, 91: 2768-2774, (2006).
  11. S.J. Pickering, “Recycling technologies for thermoset composite materials—current status”, *Composites: Part A* 37: 1206–1215, (2006).
  12. D. Perrin, L. Clerc, E. Leroy, J.-M. Lopez-Cuesta, A. Bergeret, “Optimizing a recycling process of SMC composite waste”, *Waste Management*, 28: 541–548, (2008).
  13. A.Ashori, and A.Nourbakhsh, “Characteristics of wood–fiber plastic composites made of recycled materials”, *Waste Management*, 29: 1291–1295, (2009).
  14. S.M. Al-Salem, and P. Lettieri, J. Baeyens “Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review”, *Waste Management* 29: 2625–2643, (2009).
  15. I. Turku, T. Karkia, A. Puurtinen, “Durability of wood plastic composites manufactured from recycled plastic”, *Heliyon*, 4: e00559, (2018).
  16. D. P. Kamdem, H. Jiang, W.Cui, J. Freed, and L. M. Matuana, “Properties of wood plastic composites made of recycled HDPE and wood flour from CCA-treated wood removed from service”, *Composites: Part A*, 35: 347–355, (2004).
  17. S. Y. Leu, T.H. Yang, S.F. Lo, and T.H. Yang, “Optimized material composition to improve the physical and mechanical properties of extruded wood–plastic composites (WPCs)”, *Construction and Building Materials* 29: 120–127, (2012).
  18. P.Y. Kuo, S.Y. Wang, J.H. Chen, H.C.Hsueh, M.J. Tsai, “Effects of material compositions on the mechanical properties of wood–plastic composites manufactured by injection molding”, *Materials and Design*, 30: 3489–3496, (2009).
  19. K. B. Adhikary, S. Pang , and M. P. Staiger, “Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE)”, *Composites: Part B*, 39: 807–815, (2008).
  20. M. Gracia, T. Garcia, M. Schlatter, F.M. Cabrera, J. T. Manzanares, and I.Hanafi, “Recycling of acrylonitrile-butadiene-styrene using injection moulding machine”, *Procedia Technology*, 22: 399-406, (2016).
  21. J. Palmer, L. Savage, O.R. Ghita, and K.E. Evans, “Sheet moulding compound (SMC) from carbon fibre recycle,” *Composites, Part A*, 41: 1232–1237, (2010).
  22. J. Howarth, S.S.R. Mareddy, and P. T. Mativenga, “Energy intensity and environmental analysis of mechanical recycling of carbon fibre composite”, *Journal of Cleaner Production* 81: 46-50, (2014).
  23. M.Rahimia, M.Esfahanianb, M. Moradi, “Effect of reprocessing on shrinkage and mechanical properties of ABS and investigating the proper blend of virgin and recycled ABS in injection molding”, *Journal of Materials Processing Technology*, 214: 2359–2365, (2014).
  24. A. Ashmawy, R. McDonald, D. Carreon and F. Atalay, “Stabilization of marginal soils using recycled materials, Final report”, *Florida Department of Transportation*, Contract Number BD-544-4, February 2006.



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# A novel probabilistic nuclei segmentation algorithm for H&E stained histopathological tissue images

*H&E ile boyanmış histopatolojik doku imgeleri için yeni bir olasılıksal hücre çekirdeği bölütleme algoritması*

*Yazar(lar) (Author(s)): Faruk SERİN<sup>1</sup>, Metin ERTURKLER<sup>2</sup>, Mehmet GUL<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-1458-4508*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-0195-4028*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-1374-0783*

**To cite to this article (Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz):** Serin F., Erturkler M. ve Gul M., "A novel probabilistic nuclei segmentation algorithm for H&E stained histopathological tissue images", *Politeknik Dergisi*, 23(1): 7-17, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.464541

# A Novel Probabilistic Nuclei Segmentation Algorithm for H&E Stained Histopathological Tissue Images

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Faruk SERİN<sup>1\*</sup>, Metin ERTURKLER<sup>2</sup>, Mehmet GUL<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Munzur University, Tunceli, Turkey

<sup>2</sup>Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Inonu University, Malatya, Turkey

<sup>3</sup>Department of Embryology and Histology, Faculty of Medicine, Inonu University, Malatya, Turkey

(Received/Geliş: 27.09.2018 ; Accepted/Kabul : 28.02.2019)

## ABSTRACT

In this study, we propose a novel, fast and accurate segmentation algorithm to segment nuclei in H&E stained histopathological tissue images. The proposed algorithm does not require pre-processing, post-processing, and any manual parameter or threshold. The algorithm utilizes probabilistic and statistical properties of the pixels' color value in the images with RGB color space, and determines whether pixels are a part of any nuclei or not by using an automatically calculated threshold value. The algorithm provides time efficiency and reduced overall cost in the segmentation. Two more algorithms are also proposed to distinguish nuclei cluster from the other clusters obtained by K-means, and eliminate false positives in nuclei cluster, which are not nuclei. In order to compare and evaluate the performance of the proposed segmentation algorithm in terms of time and cost efficiency, K-Means is preferred because of its common usage. Expert evaluation is declared as ground truth for determining the accuracy of the results. The experiments are performed on 60 healthy and 60 damaged kidney, and 60 healthy and 60 damaged liver tissue images. The evaluations show that the proposed algorithm can effectively segment nuclei. The comparison results also demonstrate that the deviation between proposed algorithm and the expert is 2%, while the deviation between K-Means and expert is 5%.

**Keywords:** Image segmentation, medical image processing, clustering methods, pattern recognition.

# H&E ile Boyanmış Histopatolojik Doku İmgeleri için Yeni Bir Olasılıksal Hücre Çekirdeği Bölütleme Algoritması

## ÖZ

Bu çalışmada, H&E boyalı histopatolojik doku imgelerindeki hücre çekirdeklerini bölütlemek için yeni, hızlı ve doğru bir bölütleme algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma ön işlem, son işlem, herhangi bir manuel parametre veya eşik değeri gerektirmez. Algoritma, RGB renk uzayında olan imgelerdeki piksellerin renk değerinin olasılıksal ve istatistiksel özelliklerini kullanır ve piksellerin herhangi bir çekirdeğin bir parçası olup olmadığını otomatik olarak hesaplanan eşik değeri kullanarak belirler. Algoritma, zaman verimliliği sağlar ve bölütleme genel maliyetini düşürür. Ayrıca, K-ortalama sonucu elde edilen kümeler içerisinde hücre çekirdeklerini içeren kümenin belirlenmesi ve hücre çekirdekleri kümesi içerisinde bulunan ancak hücre çekirdeği olmayan yanlış pozitiflerin elimine edilmesi için iki algoritma daha önerilmiştir. Önerilen bölütleme algoritmasının zaman ve maliyet verimliliği açısından performansını karşılaştırmak ve değerlendirmek için, yaygın kullanımı nedeniyle K-ortalama bölütleme algoritması tercih edilmiştir. Sonuçların doğruluğunu belirlenmesi için uzman değerlendirmesi baz alınmıştır. Deneyler 60 sağlıklı ve 60 hasarlı böbrek ile 60 sağlıklı ve 60 hasarlı karaciğer görüntüsü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmeler, önerilen algoritmanın çekirdekleri etkili bir şekilde bölütleyebildiğini göstermektedir. Karşılaştırma sonuçları ayrıca önerilen algoritma ile uzman arasındaki sapmanın %2 olduğunu, K-Ortalama ve uzman arasındaki sapmanın ise %5 olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Görüntü bölütleme, medikal görüntü işleme, kümeleme yöntemleri, örüntü tanıma.

## 1. INTRODUCTION

In histopathological analysis, the tissue samples are prepared by performing routine technical procedures which are fixation, dehydration, clearing, infiltration, embedding, sectioning, and staining respectively [1,2]. Staining procedure aims to reveal different tissue structures by staining it with different colors.

Hematoxylin-Eosin (H&E) is the most common staining technique and many pathologists believe that H&E will continue to be common practice over the next 50 years [3,4]. Hematoxylin stains nuclei with blue color specification, while Eosin stains other structures such as cytoplasm, connective tissue, vascular lumen, etc. with white and pink color specification. Histopathological images can be obtained by different imaging techniques [2,5] depending on usage purposes. Fast slide scanners are usually used to generate digital histopathological

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : bmfarkserin@gmail.com

images that contain relevant information about the specimen at a microscopic imaging.

An expert evaluates digital histopathological images manually or by a Computer Assisted Diagnosis (CAD) system. In practice, experts visually examine the tissue sections through a microscope. However, this approach is slow, time consuming [6] and error-prone due to inexperience and subjectivity of experts. It is also presented in [7–9] that the experts make joint decision between 61% and 73%.

CAD systems have been used in histopathology besides other medical fields to provide quantitative data to experts in diagnosis process [3,10–23]. Furthermore, these data acquired by a CAD system may provide more confidence in decision-making process during a diagnosis. CAD systems also reduce the workload, and speed up the diagnosis and treatment process. Thanks to recent advances in CAD systems, different various disease detection and grading application have been proposed, including counting of ovary follicles [24], compute areas and volume of the scar cardiac tissue [19], diagnosing melanocytic and non-melanocytic skin lesions [25], locating and qualification of fatty and necrosis area of liver tissues [21–23], detection and analysis of cancer such as breast [26], prostate [27], lung [28].

Segmentation is an important initial step of many CAD systems, and the success of the CAD systems largely depends on the quality of the segmentation algorithm. A segmentation algorithm aims to separate interested tissue structure from others. However, it is not an easy task due to the complex nature of histopathological images and the variability in the sample preparation, staining and image acquisition process. In many histopathological image analysis systems, segmentation mainly focuses on identification of nuclei owing to its major and distinct properties. The nuclei can be identified by using general or specific image segmentation algorithms.

Well-known image segmentation algorithms can be categorized based on threshold, edge, region, and cluster in the literature. Threshold based segmentation assumes that certain structures have significantly different intensities than the background or other structures. It applies a fixed threshold value to image globally or locally. The threshold value can be depending on the global or local features of the image such as color intensities, histogram, and statistical properties of the features. The threshold value can be determined manually or calculated by a method such as Otsu [29]. Edge based segmentation algorithms are performed on especially gray level images by detecting strength intensity changes in pixels. The first or second order derivative operators such as Prewitt, Sobel, Canny, Test, Zero-Crossings and Laplacian are used to identify the pixels changing. These pixels constitute of the boundary of components. Region based segmentation algorithms aim to divide the image into homogeneous sub-regions considering similarity criteria such as a thresholded color

value, equality of gray level, or relationship between any features based on histogram, color, etc. Region Growing [30], Splitting and Merging [31] are well known algorithms of this category. Clustering based segmentation algorithms such as K-Means, Fuzzy C-Means and Unsupervised Fuzzy C-Means separate images into different homogeneous sub-images called cluster. K-means [13,22,23,32] and Fuzzy C-Means [33,34] divide image into  $n$  clusters. The determination of number and initial pixels of clusters plays essential role in success of the segmentation.

Specific nuclei segmentation algorithms have also been presented in the literature. H. Kong et al. proposed to classify pixels of histopathological images into cell and extra-cellular clusters by using color-texture properties instead of color intensities. The color-texture at each pixel is extracted by using local Fourier transform from the most discriminant color space that is optimized to be a linear combination of the original RGB color space [35]. X. Zhang et al. developed a segmentation method to describe cell by using Gaussian-based hierarchical voting and repulsive balloon model [36]. Y. Xu et al. proposed the multiple clustered instance learning to classify, segment and cluster medical images [37]. S. Wienert et al. suggested contour based cell detection and segmentation method utilizing minimal priori information and avoiding segmentation bias related to shape features. [38]. Y. Al-Kofahi et al. proposed a novel segmentation method consisting of various ideas. In first step of the method, foreground is separated from histopathological images by using graph-cut based binarization. After that, seed point of nuclei is obtained by multi-scale Laplacian of Gaussian filtering that is restrained by distance-map-based adaptive scale selection. These points are then used to perform initial segmentation improved by using second graph-cut based algorithm including the alpha expansions and graph coloring methods [39].

The well-known image segmentation and specific histopathological image segmentation algorithms require pre-processing, post-processing, algorithm specific parameter or threshold value determined manually. These increase the mathematical calculations naturally. However, the nuclei segmentation can be performed without these operations to achieve relatively reduced overall operational cost, if the concern is to segment cell nuclei in H&E stained histopathologic images, which is major structure of a tissue especially in cancer researches.

Two main contributions are presented in this study. The first contribution is proposed Probabilistic Nuclei Segmentation Algorithm. The algorithm is novel, fast and accurate. In addition, it does not require pre-processing, post-processing, and any parameter or threshold value determined manually, to identify nuclei in H&E stained histopathological images. The algorithm utilizes probabilistic and statistical properties of the pixels' color value in the images with RGB color space, and determines whether pixels are a part of any nuclei or

not by using an automatically calculated threshold value. The probabilistic and statistical operations are focused on blue channel of the RGB color space due to the fact that the cell nuclei are stained with blue in the H&E stained histopathological images. This approach provides time efficiency and reduced overall cost in nuclei segmentation process. Two more algorithms are proposed as second contribution to distinguish cluster containing nuclei from the other clusters obtained by K-means, and eliminate false positives in nuclei cluster, which are not nuclei.

We preferred to compare our proposed algorithm with a well-known segmentation algorithm, which has been used in histopathological image segmentation, to evaluate the performance of the proposed nuclei segmentation algorithm in terms of time and cost efficiency as well as accuracy of results. For this, K-means is considered because of its common usage [12,13,22,23,32,40,41]. The accuracy of an algorithm for nuclei segmentation is to locate and identify all nuclei correctly in histopathological image. Expert evaluation is declared as ground truth for determining the accuracy of the proposed algorithm.

The experiments performed on 60 healthy and 60 damaged kidney, and 60 healthy and 60 damaged liver tissue images reveal that the proposed algorithm is effective to obtain accurate nuclei segmentation and cell counting. In addition, the experiments show that the results of the proposed algorithm are closer to expert's evaluation than the results of K-Means. It is also shown that the proposed algorithm is faster than K-Means.

The rest of this paper is organized as follows. Section 2 highlights the requirements of the histopathological image segmentation algorithms and introduces K-Means. Nuclei distinguishing, and false positive removal algorithm are also explained in Section 2. The proposed segmentation algorithm is presented and analyzed in section 3. Section 4 describes dataset, evaluations and discussions of experiments. Conclusions are summarized in section 5.

## 2. CELL NUCLEI SEGMENTATION

The well-known histopathological image segmentation algorithms generally require pre-processing, post-processing, algorithm specific parameters or threshold value determined manually as stated in introduction. Watershed needs to convert image color space from RGB to gray-scale as a pre-processing step. Similarly, thresholding requires transforming color space from RGB to binary or gray-scale in pre-processing step. K-Means, Watershed, Region Growing and Fuzzy C-Means algorithms segment image into different clusters, but the algorithms does not identify the cluster containing nuclei. Thus, the algorithms include a post-processing step. In addition, K-Means needs parameters to determine the number of cluster and initial location of each cluster. Region Growing requires also number of seed and initial position of each seed. In threshold-based segmentation

algorithms, determination of a threshold value parameter is necessary as well.

The proposed algorithm is compared to K-Means Segmentation Algorithm since it is widely used in histopathological image segmentation [12,13,22,23, 32,40,41].

### 2.1. K-Means Segmentation Algorithm

K-Means Segmentation Algorithm divides image into homogeneous sub-images as clusters. Thus, it is essential to determine number of clusters for clear segmentation. The number of clusters can be determined manually or computationally [42]. If number of clusters is predictable, it is determined manually to avoid raising the computational cost. K-Means Segmentation Algorithm is expressed step by step as follows:

1. Number of clusters is determined.
2. Initial centroid of clusters is selected.
3. Distances between pixels and centroids are calculated by using Euclidian distance as in (1).

$$d_{i,j} = \|p_i - \mu_j\| \quad (1)$$

where  $p_i$  is location of  $i^{\text{th}}$  pixel,  $i = [1, 2, 3, \dots, \text{the number of pixels}]$ ,  $\mu_j$  is centroid of  $j^{\text{th}}$  cluster,  $j = [1, 2, 3, \dots, \text{the number of clusters } k]$ ,  $d_{i,j}$  is Euclidian distance between location of  $i^{\text{th}}$  pixel and centroid of  $j^{\text{th}}$  cluster.

4. Each pixel is assigned to nearest cluster.
5. Centroid of clusters is recalculated as in (2).

$$\mu_j = \frac{1}{n_j} \sum_{l=1}^{n_j} p_l^j \quad (2)$$

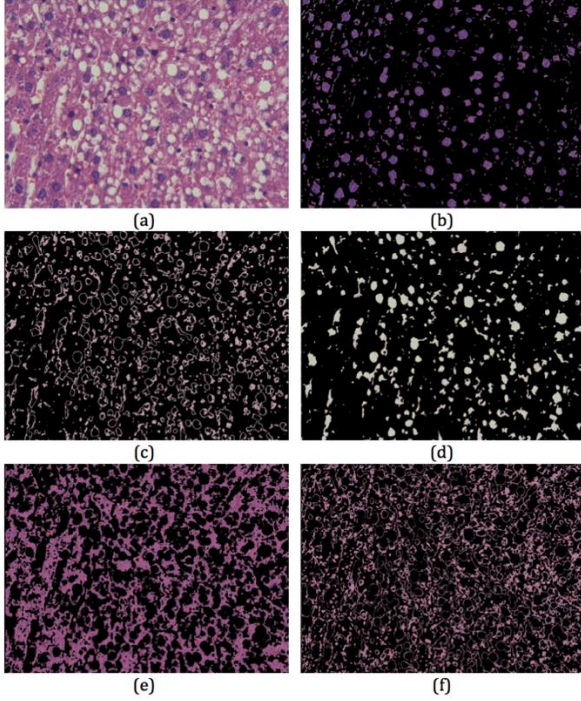
where  $n_j$  is number of pixels in  $j^{\text{th}}$  cluster,  $p_l^j$  is location of  $l^{\text{th}}$  pixels in  $j^{\text{th}}$  cluster.

6. Steps 3, 4 and 5 are repeated as long as the centroid of clusters shifts. This repetition can be terminated when the amount of shift is smaller than a predefined threshold value.

Cost function of K-Means  $J$  is calculated by summing of squares of Euclidian distances between each pixel and centroid of cluster that contains the pixel as in (3).

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^{n_j} \|p_l^j - \mu_j\|^2 \quad (3)$$

A histopathological liver tissue image shown in Figure 1(a) is used to demonstrate the segmentation results of K-Means with 5 clusters. The clusters results of segmentation are shown in Figure 1(b-f). The structures in histopathological image are assigned to different clusters as seen in Figure 1. In this paper, we propose an algorithm to distinguish nuclei cluster from these different clusters automatically, since K-Means cannot distinguish nuclei cluster itself without post-processing.



**Figure 1.** A histopathological liver tissue image and its K-Means segmentation result with 5 clusters (a) Liver image. (b) Nuclei. (d) Fat vacuoles, vascular lumens and connective tissue. (c), (e), and (f) Cytoplasm.

## 2.2. Distinguishing Nuclei Cluster

The segmented structures are not identified after cluster-based segmentation algorithms such as K-Means. Thus, it is required to distinguish the cluster containing the nuclei from the other clusters. We propose to take advantage of average of structure's color intensity value for identification. First, clusters are converted to gray level images and average of structure's gray level intensity value is calculated by considering only pixels of white foreground structures without pixels of black background area. Second, cluster with minimum average is identified as the nuclei cluster because structures stained with blue color have lower intensity value than the other image structures in H&E stained histopathological tissue images. Distinguishing of the nuclei cluster is formulated in (4), (5) and (6).

$$S_j = \sum_{l=1}^{n_j} I_j(p_l^j) \quad (4)$$

$$C_j = \frac{S_j}{n_j} \quad (5)$$

$$N = \text{minimum}(C) \quad (6)$$

where  $n_j$  is number of pixels in  $j^{\text{th}}$  cluster,  $p_l^j$  is location of  $l^{\text{th}}$  pixels in  $j^{\text{th}}$  cluster,  $I_j$  is gray level image of  $j^{\text{th}}$  cluster,  $S_j$  is total gray level intensity of  $I_j$ ,  $C_j$  is average gray level intensity of  $I_j$ ,  $N$  is nuclei cluster binary image.

The obtained nuclei cluster after applying the proposed distinguishing algorithm to clusters in Figure 1(b-f) is shown in Figure 2(a). As seen in Figure 1(b) and Figure 2(a), nuclei cluster contains false positive tiny points that are not nuclei. These points have to be removed from cluster to segment nuclei accurately.

## 2.3. False Positive Removal

Tiny points in blue color specification can be seen in the H&E stained histopathological images when the images are examined in detail. These misleading points can occur due to the complex nature of histopathological tissue and the variability in the sample preparation, staining and image acquisition process. Thus, these points cause to appear false positive points (FPP) in nuclei cluster. These FPP are in fact not part of any nuclei. The FPP is required to be removed from nuclei cluster for preventing identification of misleading points as cell nuclei. A false positive removal algorithm is proposed to remove the FPP.

Area of FPP is considerably smaller than a nucleus area. Thus, area thresholding is applied to nuclei cluster to remove FPP in binary nuclei cluster. The threshold can be determined manually depending on nature and resolution of image or automatically. In automatic thresholding, first  $r$  the ratio between number of pixels in foreground of binary nuclei cluster and resolution of image (total pixels count of the image) is computed as in (7). The calculated ratio  $r$  is used as circle radius. Then, the area of circle of radius  $r$  is calculated as in (8) and this area is used as area threshold  $\mathcal{T}$ . Finally, the component whose area is smaller than  $\mathcal{T}$  is removed from binary nuclei image as in (9).

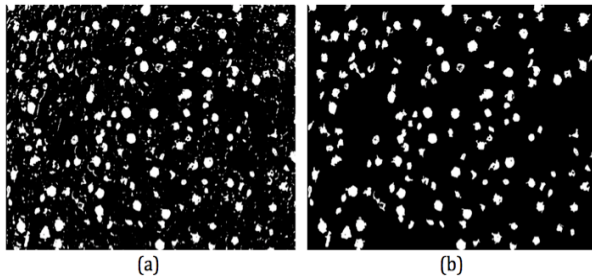
$$r = \frac{\psi}{\varphi} \quad (7)$$

$$\mathcal{T} = \pi r^2 \quad (8)$$

$$F_i = \begin{cases} 1, & A_i \geq \mathcal{T} \\ 0, & A_i < \mathcal{T} \end{cases} \quad (9)$$

where  $\psi$  is the resolution of image, which is number of pixel in image;  $\varphi$  is the number of pixels in foreground of binary nuclei image;  $r$  is the ratio between the number of pixels in foreground of binary nuclei image and resolution of image;  $\mathcal{T}$  is the area of circle of radius  $r$ ;  $A_i$  is the area of  $i^{\text{th}}$  foreground component, which is the number of pixels in the component;  $F_i$  is false positive removal function of  $i^{\text{th}}$  component. The component is removed from image if  $F_i$  equals to 0. The solution for overlapping nuclei is proposed in [11].

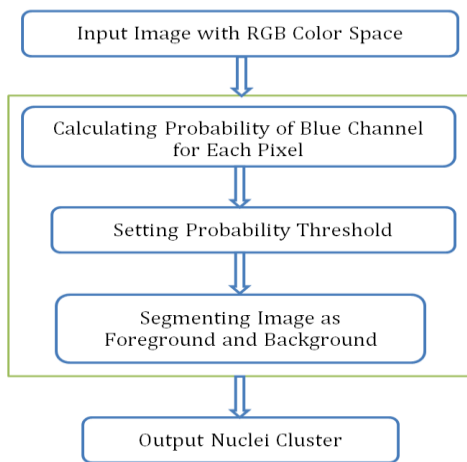
The proposed false positive removal algorithm is applied to nuclei cluster in Figure 2(a). The obtained nuclei are shown in Figure 2(b) where FPP are removed.



**Figure 2.** Segmentation result of Figure 1(a) by K-Means Segmentation Algorithm (a) Binary nuclei cluster that is result of distinguishing algorithm. (b) Nuclei that is result of false positive removal algorithm.

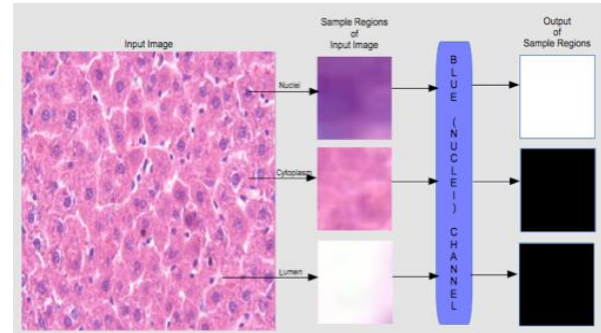
### 3. THE PROPOSED SEGMENTATION ALGORITHM

Tissue staining technique plays an important role in selection and success of segmentation algorithms. Many pathologists believe H&E staining will maintain its dominance in practice over the next 50 years [3,4]. When histopathological tissue sections are stained with H&E, cell nuclei are typically stained with blue color and its specifications in the images with RGB (Red, Green, and Blue) color space [5]. Thus, blue color value of nuclei is generally greater than their red and green color value. The proposed algorithm aims to separate nuclei from the other structures in H&E stained histopathological tissue images on the strength of these truths. The overall schematic of the proposed algorithm is shown in Figure 3.



**Figure 3.** The overall schematic of the proposed algorithm

The proposed algorithm processes an input image with RGB color space depending on color specification the image contains. The regions that contain blue color specifications are determined as foreground (nuclei) while the rest of the image is determined as background after the proposed algorithm processes each pixel in the image. As shown in Figure 4, the output of foreground is white, and the output of background is black.



**Figure 4.** The sample input and output regions for the proposed algorithm working on blue channel

The proposed algorithm firstly calculates the ratio of blue (B) value for each pixel as in (10). This ratio represents the probability of being a part of any nuclei for the pixels. By utilizing these probabilities, the threshold value  $t$  is set as in (11), (12) and (13) to decide if the pixel is a part of any nuclei or background. The decision function is presented in (14).

$$p_i = \frac{b_i}{(r_i + g_i + b_i)} \quad (10)$$

where  $r_i$ ,  $g_i$ , and  $b_i$  are red, green, and blue values of  $i^{\text{th}}$  pixel in RGB color space respectively;  $p_i$  is the ratio of the blue value that represents the probability of being a part of any nuclei for  $i^{\text{th}}$  pixel.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (p_i - \mu)^2} \quad (12)$$

$$t = \mu + \sigma \quad (13)$$

where  $n$  is number of pixels,  $\mu$  is the mean of the probabilities,  $\sigma$  is standard deviation of probabilities.

$$f_i = \begin{cases} 1, & p_i \geq t \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

The pixel is a part of any nuclei, if decision function  $f_i$  equals to 1 for  $i^{\text{th}}$  pixel; otherwise the pixel belongs to the background. If set of images is homogeneous and threshold value is predictable,  $t$  can be calculated once or defined manually. This reduces workload, and speeds up process. However, various processes and factors such as faults in any histopathological procedure and imaging generally make the dataset heterogeneous. Thus,  $t$  is calculated as in (11-13). The homogeneity means that the similar structures in image dataset are in the similar color. The pseudocode of the proposed algorithm is given in Algorithm 1.



**Algorithm 1.** Probabilistic Nuclei Segmentation Algorithm

<b>Input:</b>	RGB image $I(x, y, z) = \{u \mid 255 \geq u \geq 0 \wedge u, x, y \in \mathbb{N} \wedge z = \{0,1,2\}\}$
<b>Output:</b>	Binary image $B(x, y) = \{0,1\}$ and $x, y \in \mathbb{N}$
<b>Variables:</b>	$v$ is vertical size of I $h$ is horizontal size of I $I(i,j,0)$ is red (R) color intensity of I $I(i,j,1)$ is green (G) color intensity of I $I(i,j,2)$ is blue (B) color intensity of I $p$ is probability $\mu$ is mean $\sigma$ is standart deviation $t$ is threshold probability $prob$ is temporary variable $n$ is temporary pixel counter variable $\delta$ is temporary variable
<b>Algorithm:</b>	<pre> 1      prob=0; 2      n=0; 3      δ=0; 4      for i = 0; i &lt; v; i=i+1 do 5          for j = 0; j &lt; h; j=j+1 do 6              <math>p_{i,j} = I(i,j,2) / (I(i,j,0) + I(i,j,1) + I(i,j,2))</math>; 7              <math>prob = prob + p_{i,j}</math>; 8          end 9      end 10     <math>n = h \times v</math>; 11     <math>\mu = prob / n</math>; 12     for i = 0; i &lt; v; i = i + 1 do 13         for j = 0; j &lt; h; j = j + 1 do 14             <math>\delta = \delta + (p_{i,j} - \mu)^2</math>; 15         end 16     end 17     <math>\sigma = \sqrt{\delta / (n - 1)}</math>; 18     <math>t = \mu + \sigma</math>; 19     for i = 0; i &lt; v; i=i+1 do 20         for j = 0; j &lt; h; j = j + 1 do 21             if <math>p_{i,j} \geq t</math> then 22                 <math>B(i,j) = 1</math>; 23             end 24             else 25                 <math>B(i,j) = 0</math>; 26             end 27         end 28     end </pre>

**3.1. Time Complexity of The Probabilistic Nuclei Segmentation Algorithm****Table 1.** Computation time of the proposed algorithm

Step	Computation	Time (CC)
1	T	1
2	T	1
3	T	1
4	$vA+(v+1)C+ (v+1)T$	$3v+2$
5	$v(hA+(h+1)C+ (h+1)T)$	$3vh+2v$
6	$vh(T+D+2A)$	$4vh$
7	$vh(T+A)$	$2vh$
8	-	-
9	-	-
10	T+M	2
11	T+D	2
12	$vA+(v+1)C+ (v+1)T$	$3v+2$
13	$v(hA+(h+1)C+ (h+1)T)$	$3vh+2v$
14	$vh(T+A+2S+M)$	$5vh$
15	-	-
16	-	-
17	T+R+D+S	4
18	T+A	2
19	$vA+(v+1)C+ (v+1)T$	$3v+2$
20	$v(hA+(h+1)C+ (h+1)T)$	$3vh+2v$
21	$vhC$	$vh$
22	$vhT$	$vh$
23	-	-
24	-	-
25	$vhT$	$vh$
26	-	-
27	-	-
28	-	-
<b>Total</b>		<b><math>22vh+15v+19</math></b>

Time complexity is important to evaluate the algorithm efficiency. Thus, time complexity of proposed Probabilistic Nuclei Segmentation Algorithm given in Algorithm 1 is calculated step by step in Table 1. The differences between the computation times of mathematical operations such as addition (A), subtraction (S), multiplication (M), division (D), comparison (C), square root (R) and assignment (T) are ignored. The computation time of the mathematical operations is denoted as A, S, M, D, C, R and T respectively. Computation time of each operation is accepted as 1 clock cycle (CC). For example,  $a=b/f+d+e$  is denoted as  $T+D+2A$ , which means there are 1 assignment, 1 division and 2 addition. The total computation time of the expression is equal to 4 CC.

Step 22 and 25 do not operate together. Only one of them is operated and total computation time of these two steps

is  $vh$ . The worst case, best case and average case of the proposed algorithm is the same as in (15).

$$T = 22vh + 15v + 19 = O(vh) = O(n) \quad (15)$$

As seen in (15), the time complexity of the proposed algorithm is  $O(n)$  where  $n$  is number of pixels in the image.

## 4. EXPERIMENTS

### 4.1. Datasets

In this study, histopathological images of liver and kidney tissues were obtained by the expert at Inonu University and these images were used for experiment. Liver tissue samples were removed from 150-180g male Wistar Albino Rats grouped as healthy (control) damaged. The damaged group were injected with olive oil and 1 ml/kg/day  $CCl_4$  a xenobiotic used in the generation of experimental liver damage, and causes injury on liver by increasing generation of free radicals, decreasing the activities of antioxidant enzymes, and inducing lipid peroxidation. Kidney tissue samples were removed from left kidney of 250-280g male Sprague Dawley Rats grouped as damaged and healthy. 100 mg/kg/day the intraperitoneal Aluminium Chloride ( $AlCl_3$ ) was injected to damaged group. The rats had been held in 22-24 °C rooms, the seasonal daylight period, and fed with standard rat chow pellets and tap water. The rats were slept using Ketamine (Ketalar, Parke-Davis, Eczacıbaşı, Turkey) and Xylazine HCl (Alfazyne %2; Alfasan, Woerden, Netherlands) anesthesia and tissue samples were taken. The samples determined with 10% formaldehyde were embedded into paraffin block through routine histologic follow-up procedures. The sections were cut with a microtome and stained with H&E. The images were taken from these sections by Leica DFC280 light microscopy and Leica Q Win (Leica Microsystems Imaging Solutions, Cambridge, UK) image analysis system.

Kidney images have 1920x2560 and liver images have 768x1024 resolution. Eight of the obtained 240 histopathological images are shown in Figure 5 where there are three components with blue, pink and white color. Blue ones represent nuclei whereas pink and white ones represent other tissue structures. Dataset consists of 60 healthy and 60 damaged kidney, and 60 healthy and 60 damaged liver tissue images.

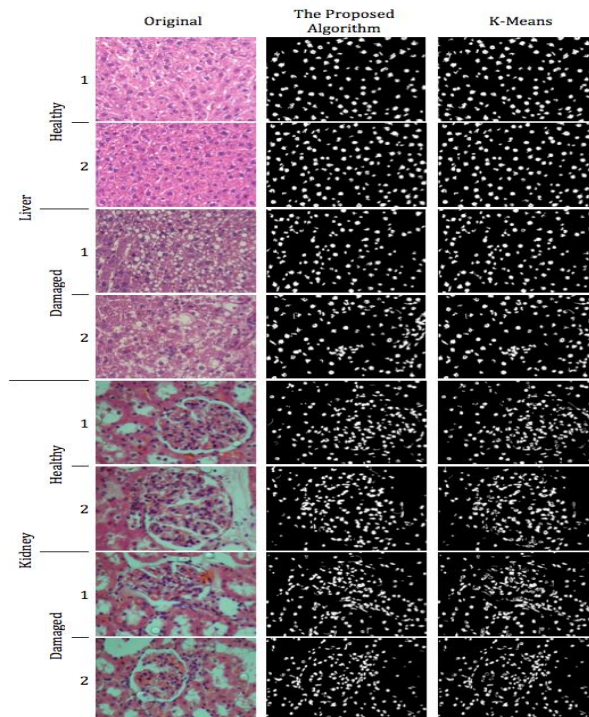
### 4.2. Evaluation

Segmentation of cell nuclei is a crucial step in automatic analysis of histopathological images. In the experiment, K-Means [43] and the proposed algorithm are used for segmentation. In preprocessing step for K-Means, RGB images are converted to  $L^*a^*b^*$  color space image to reduce color space from three channels (R-G-B) to two channels ( $a^*-b^*$ ). 'L\*' layer of the  $L^*a^*b^*$  space indicates a luminosity, 'a\*' layer indicates chromaticity (red-green), and 'b\*' layer indicates chromaticity (blue-yellow). K-Means is applied to 'a\*' and 'b\*' layers in which all of the color information is. Number of clusters

for K-Means is selected as 5. Proposed distinguishing algorithm is applied to distinguish nuclei cluster from other clusters. False positive removal algorithm is used to remove non-nuclei components from nuclei cluster.

The segmentation results of K-Means and the proposed algorithm for eight liver and kidney images are shown in Figure 5. The nuclei segmented by the proposed algorithm and K-Means can be counted by any connected component labeling method such as [44]. The expert also counted the nuclei in images manually. The number of nuclei segmented by K-Means, the proposed algorithm, and expert is illustrated in Table 2 for quantitative comparison. As shown in Table 2, the number of the cell counted by the proposed algorithm is closer to expert evaluation than K-means.

The number of nuclei segmented by the proposed algorithm and K-Means is plotted in Figure 6 for 200 images in dataset. The difference between the number of nuclei segmented by the proposed algorithm and K-Means is also plotted in Figure 6 in order to illustrate variation. However, the results for 40 images in dataset are not plotted in Figure 6 since K-Means produces over-segmented or under-segmented results for these images. Why K-Means produces such results and how the proposed algorithm eliminates these errors are described in discussion section. The comparison results also demonstrate that the deviation between the proposed algorithm and the expert is 2%, whereas the deviation between K-Means and Expert is 5%.



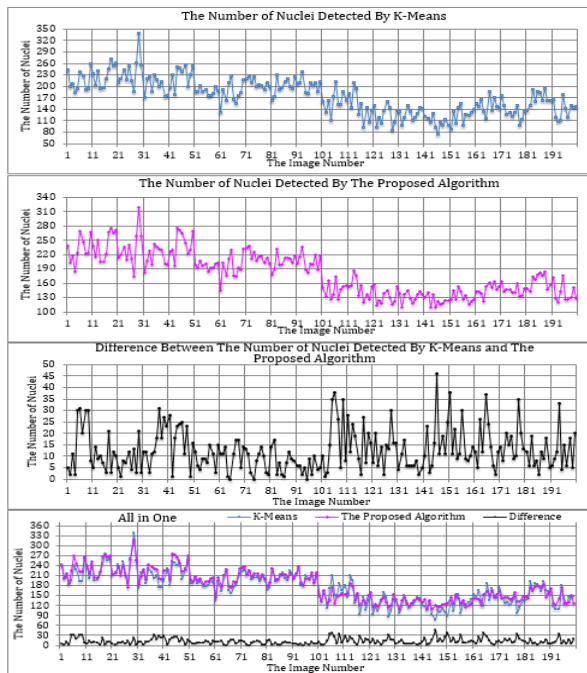
**Figure 5.** Histopathological liver and kidney tissue images and segmentation results

**Table 2.** The number of nuclei for images in Figure 5

Kind	No	K-Means	The Proposed Algorithm	Expert	
Liver	Healthy	1	148	128	119
		2	161	167	164
	Damaged	1	145	143	143
		2	135	139	139
Kidney	Healthy	1	201	199	196
		2	181	181	176
	Damaged	1	215	211	206
		2	206	217	217

**Table 3.** Processing time of the algorithms

Method	Tissue	Kind	Time (second)
K-Means	Segmentation	Liver	Healthy 8.121 Damaged 9.038
		Kidney	Healthy 26.888 Damaged 39.315
	Distinguishing	Liver	Healthy 0.126 Damaged 0.116
		Kidney	Healthy 0.335 Damaged 0.568
The proposed algorithm	Liver	Healthy 1.350 Damaged 1.335	
		Kidney	Healthy 5.104 Damaged 8.462



**Figure 6.** The number of nuclei segmented by the proposed algorithm and K-Means, and difference between them. 1-50: healthy kidney, 51-100: damaged kidney, 101-150 healthy liver and 151:200 damaged liver tissue images.

**Table 4.** Ratio of processing time for the algorithms

Tissue	Kind	Time (second)		
		K-Means (K)	The Proposed Algorithm (P)	Ratio (K/P)
Liver	Healthy	8.247	1.350	6.109
	Damaged	9.153	1.335	6.857
Kidney	Healthy	27.223	5.104	5.334
	Damaged	39.883	8.462	4.713
<b>Average</b>		22.443	3.930	5.575

The segmentation results of two algorithms are generally close to each other except images that K-Means fails to segment. However, there is relatively more difference between some results especially in the liver images as seen in Figure 6, since the difference between the distributions ratios of the components in the liver images, which are stained with different color, is greater than the difference between the distributions ratios of the components in the kidney images. The details are in discussion section.

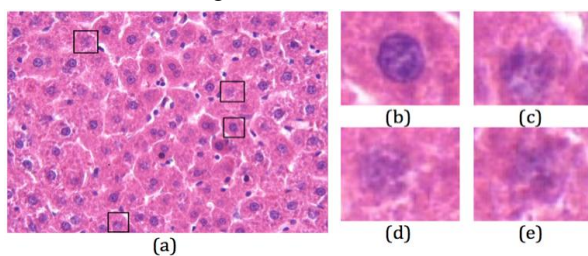
The proposed method is much more efficient than K-means in terms of processing time. The processing times of K-Means and the proposed algorithm for all images in dataset are shown in Table 3 and Table 4.

The proposed distinguishing algorithm takes much less time than segmentation in K-Means as seen in Table 3. The ratios of total processing time for two algorithms are presented in Table 4 for more convenient comparison of the processing times. Distinguishing and segmentation times of K-Means are summed in Table 4.

The processing time of K-Means changes depending on selection of the initial points for clusters, whereas processing time of the proposed algorithm is constant for an image. The proposed algorithm is approximately 6 times faster than K-Means in average as seen in Table 4.

### 4.3. Discussion

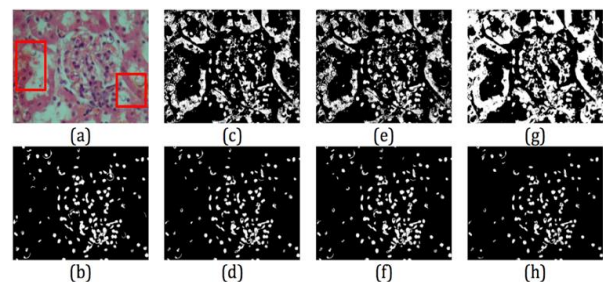
In histopathological image analysis, experts and CAD systems rely on histological tissue specimens. The complex three-dimensional (3D) specimens consisting of structures such as cell nuclei or cytoplasm is sectioned with a microtome into thin sections, and two-dimensional (2D) images are obtained from these sections. The size, shape, color specification and frequency of nuclei in the sections depend on a variety of parameters, including the orientation and position of the sectioning plane. The nuclei in sections are shown as blue spots in the images. The distance between microtome and nuclei affects the blue color specification of the nuclei in sectioning process. The nuclei appear in dark blue color specification as in Figure 7(b), if the microtome passes through the nuclei. However, the nuclei appear in light blue color specification as in Figure 7(c-e), if the microtome passes over the nuclei. The expert, K-Means, and the proposed algorithm can see and segment dark nuclei easily, whereas determination of the nuclei shown in Figure 7(d-e) is more difficult. In case of many nuclei with light blue color specification, the result of expert and the proposed algorithm is close to each other than K-Means as seen in Figure 5 and Table 2.



**Figure 7.** Representation of nuclei in different color specification of blue. (a) A histopathological tissue image (b) A nucleus of (a) in dark blue color specification. (c-e) A nucleus of (a) in light blue color specification.

Imperfections in routine technical procedures in preparation process of the tissue samples may yield more different color specification than three main color specification in H&E stained tissue images. An example of this can be seen in Figure 8(a), where two samples of unexpected color specification are shown in rectangles. These imperfections may hamper performance of segmentation algorithms, while may have no effect on the expert's evaluation. A test image with imperfections

shown in Figure 8(a) is segmented with the proposed algorithm and K-Means and evaluated by the expert. While the number of nuclei counted by the expert is 130 and the number of nuclei segmented by the proposed algorithm is 125 for Figure 8(b), K-Means produces different results depending on the cluster initial point selected randomly. There are two different results of K-Means as seen in Figure 8(c-d) when the number of clusters is determined as 5. The number of segmented nuclei in Figure 8(d) is 122 that is close to expert and the proposed algorithm results, while there is under-segmentation in Figure 8(c). When the number of clusters is determined as 3, K-Means produces over-segmented results as seen in Figure 8(g). In addition, the number of clusters is increased and selected as 6, K-Means produces under-segmented result as shown in Figure 8(h). The similar results as seen in Figure 8(e-f) are obtained when the number of clusters is selected as 4. The proposed algorithm has no requirements of factors such as number of clusters or initial points, and thus segments images with imperfections accurately.



**Figure 8.** Over and under segmentation example for K-Means

## 5. CONCLUSIONS

Segmentation is a crucial initial stage of many CAD systems, and the quality of the segmentation algorithm significantly affects the success of the CAD system. In this paper, a novel segmentation algorithm named Probabilistic Nuclei Segmentation Algorithm is proposed to segment H&E stained histopathological images without any requirement of pre-processing, post-processing, and any parameter or a threshold value determined manually. Experimental results show that the proposed algorithm segments histopathological images more accurately and approximately 6 times quickly than K-Means. Additionally, the proposed algorithm is able to yield a success result in case of processing images with imperfections, where K-Means fails to produce success result. The comparison results of the number of nuclei also demonstrate that the deviation between the proposed algorithm and the expert is 2%, while the deviation between K-Means and Expert is 5%.

In addition, the study has two other contributions. First, the distinguishing nuclei cluster algorithm is developed to distinguish nuclei cluster from other clusters for K-means. Second, false positive removal algorithm is proposed to eliminate tiny points of nuclei cluster, which can cause deceptive nuclei evaluation.

## REFERENCES

- [1] Mills, S.E., “*Histology for Pathologists*”, Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, (2012).
- [2] Suvarna, K.S., Layton, C. and Bancroft, J.D., “*Bancroft’s Theory and Practice of Histological Techniques*”, Elsevier Health Sciences UK, (2012).
- [3] He, L., Long, L.R., Antani, S. and Thoma, G., “Computer assisted diagnosis in histopathology”, *Seq. Genome Anal. Methods Appl.*, 271–287, (2010).
- [4] Fox, H., “Is H&E morphology coming to an end?” *J. Clin. Pathol.*, 53: 38–40, (2000).
- [5] Murphy, D.B. and Davidson, M.W., “*Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging*”, Wiley-Blackwell, Hoboken, N.J., (2012)
- [6] Thomas, G.D., Dixon, M.F., Smeeton, N.C. and Williams, N.S., “Observer variation in the histological grading of rectal carcinoma”, *J. Clin. Pathol.*, 36: 385–91, (1983).
- [7] Metter, G.E., Nathwani, B.N., Burke, J.S., Winberg, C.D., Mann, R.B., Barcos, M., Kjeldsberg, C.R., Whitcomb, C.C., Dixon, D.O. and Miller, T.P., “Morphological subclassification of follicular lymphoma: variability of diagnoses among hematopathologists, a collaborative study between the Repository Center and Pathology Panel for Lymphoma Clinical Studies”, *J. Clin. Oncol.*, 3: 25–38, (1985).
- [8] Dick, F., VanLier, S., Banks, P., Frizzera, G., Witrak, G., Gibson, R., Everett, G., Schuman, L., Isacson, P., O’Conor, G., Cantor, K., Blattner, W. and Blair, A., “Use of the Working Formulation for Non-Hodgkin’s Lymphoma in Epidemiologic Studies: Agreement Between Reported Diagnoses and a Panel of Experienced Pathologists”, *J. Natl. Cancer Inst.*, 78: 1137–44, (1987).
- [9] Chan, W.C., Armitage, J.O., Gascoyne, R., Connors, J., Close, P., Jacobs, P., Norton, A., Lister, T.A., Pedrinis, E., Cavalli, F. and others, “A clinical evaluation of the International Lymphoma Study Group classification of non-Hodgkin’s lymphoma”, *Blood*, 89: 3909–3918, (1997).
- [10] Serin, F., Erturkler, M. and Gül, M., “K-nearest unrepeatable cell graph model of histopathological tissue image”, *2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2585–8, (2015).
- [11] Serin, F., Erturkler, M. and Gul, M., “A novel overlapped nuclei splitting algorithm for histopathological images”, *Comput. Methods Programs Biomed.*, 151: 57–70, (2017).
- [12] Gunduz, C., Yener, B. and Gultekin, S.H., “The cell graphs of cancer”, *Bioinformatics*, 20: i145–51, (2004).
- [13] Ng, H.P., Ong, S.H., Foong, K.W.C., Goh, P.S. and Nowinski, W.L., “Medical image segmentation using K-means clustering and improved watershed algorithm”, *2006 IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation*, 61–65, (2006).
- [14] Petushi, S., Garcia, F.U., Haber, M.M., Katsinis, C. and Tozeren, A., “Large-scale computations on histology images reveal grade-differentiating parameters for breast cancer”, *BMC Med. Imaging*, 6: 14, (2006).
- [15] Bilgin, C., Demir, C., Nagi, C. and Yener, B., “Cell-Graph Mining for Breast Tissue Modeling and Classification”, *2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 5311–4, (2007).
- [16] Gurcan, M.N., Boucheron, L.E., Can, A., Madabhushi, A., Rajpoot, N.M. and Yener, B., “Histopathological image analysis: A review”, *Biomed. Eng. IEEE Rev. In.*, 2: 147–171, (2009).
- [17] Kothari, S., Chaudry, Q. and Wang, M.D., “Automated cell counting and cluster segmentation using concavity detection and ellipse fitting techniques”, *2009 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Macro. IEEE*, 795–8, (2009).
- [18] Bilgin, C.C., Bullough, P., Plopper, G.E. and Yener, B., “ECM-aware cell-graph mining for bone tissue modeling and classification”, *Data Min. Knowl. Discov.*, 20: 416–438, (2010).
- [19] Malu, G., Balakrishnan, K. and Bodhey, N.K., “Area and volume calculation of necrotic tissue regions of heart using interpolation”, *2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT)*, 728–30, (2011).
- [20] Baykara, M., Erturkler, M., Gul, M. and Harputluoglu, M., “Karaciğer Dokusundaki Nekroz Alanın Doku Tabanlı Bölütleme Kullanılarak Belirlenmesi ve Nicemlenmesi”, *Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu (ASYU)*, Trabzon/Turkey, (2012).
- [21] Ozseven, T., Erturkler, M., Nurmuhammed, M., Gul, M. and Harputluoglu, M., “Quantifying the necrotic areas on liver tissues using support vector machine (SVM) algorithm and Gabor filters”, *2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, 1–5, (2012).
- [22] Serin, F., Erturkler, M., Gul, M. and Yigitcan, B., “Non-Alkolik Yağlı Karaciğer Hastalığında Karaciğerdeki Yağ Vakuelleri Oranının Hesaplanması”, *Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu (ASYU)*, 306–10, (2012).
- [23] Serin, F., Erturkler, M., Gul, M. and Yigitcan, B., “Investigating the effects of melatonin and resveratrol agents on non-alcoholic fatty liver disease”, *Glob. J. Technol.*, 3, (2013).
- [24] Skodras, A., Giannarou, S., Fenwick, M., Franks, S., Stark, J. and Hardy, K., “Object recognition in the ovary: Quantification of oocytes from microscopic images”, *2009 16th International Conference on Digital Signal Processing*, 1–6, (2009).
- [25] Chang, W.-Y., Huang, A., Yang, C.-Y., Lee, C.-H., Chen, Y.-C., Wu, T.-Y. and Chen, G.-S., “Computer-Aided Diagnosis of Skin Lesions Using Conventional Digital Photography: A Reliability and Feasibility Study”, *PLOS ONE*, 8: e76212, (2013).
- [26] Veta, M., Pluim, J.P.W., van Diest, P.J. and Viergever, M.A., “Breast Cancer Histopathology Image Analysis: A Review”, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 61: 1400–11, (2014).
- [27] Wang, S., Burtt, K., Turkbey, B., Choyke, P., Summers, R.M., Wang, S., Burtt, K., Turkbey, B., Choyke, P. and Summers, R.M., “Computer Aided-Diagnosis of Prostate Cancer on Multiparametric MRI: A Technical Review of Current Research, Computer Aided-Diagnosis of Prostate Cancer on Multiparametric MRI: A Technical Review of Current Research”, *BioMed Res. Int. BioMed Res. Int.*, 2014, 2014: e789561, (2014).

- [28] Firmino, M., Morais, A.H., Mendça, R.M., Dantas, M., Hekis, H. and Valentim, R., "Computer-aided detection system for lung cancer in computed tomography scans: Review and future prospects", *Biomed Eng Online*, 13: 1–16, (2014).
- [29] Otsu, N., "A threshold selection method from gray-level histograms", *Automatica*, 11: 23–27, (1975).
- [30] Adams, R. and Bischof, L., "Seeded region growing", *Pattern Anal. Mach. Intell. IEEE Trans. On*, 16: 641–647, (1994).
- [31] Patil, D.D. and Deore, S.G., "Medical image segmentation: a review", *Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput.*, 2: 22–27, (2013).
- [32] Zhang, C., Xiao, X., Li, X., Chen, Y.-J., Zhen, W., Chang, J., Zheng, C. and Liu, Z., "White Blood Cell Segmentation by Color-Space-Based K-Means Clustering", *Sensors*, 14: 16128–47, (2014).
- [33] Zhang, D.-Q. and Chen, S.-C., "A novel kernelized fuzzy c-means algorithm with application in medical image segmentation", *Artif. Intell. Med.*, 32: 37–50, (2004).
- [34] Chuang, K.-S., Tzeng, H.-L., Chen, S., Wu, J. and Chen, T.-J., "Fuzzy c-means clustering with spatial information for image segmentation", *Comput. Med. Imaging Graph.*, 30: 9–15, (2006).
- [35] Kong, H., Belkacem-Boussaid, K. and Gurcan, M., "Cell nuclei segmentation for histopathological image analysis", *SPIE Medical Imaging*, International Society for Optics and Photonics, 79622R–79622R, (2011).
- [36] Zhang, X., Xing, F., Su, H., Yang, L. and Zhang, S., "High-throughput histopathological image analysis via robust cell segmentation and hashing", *Med. Image Anal.*, 26: 306–15, (2015).
- [37] Xu, Y., Zhu, J.-Y., Chang, E.I.-C., Lai, M. and Tu, Z., "Weakly supervised histopathology cancer image segmentation and classification", *Med. Image Anal.*, 18: 591–604, (2014).
- [38] Wienert, S., Heim, D., Saeger, K., Stenzinger, A., Beil, M., Hufnagl, P., Dietel, M., Denkert, C. and Klauschen, F., "Detection and segmentation of cell nuclei in virtual microscopy images: a minimum-model approach", *Sci. Rep.*, 2: 503, (2012).
- [39] Al-Kofahi, Y., Lassoued, W., Lee, W. and Roysam, B., "Improved Automatic Detection and Segmentation of Cell Nuclei in Histopathology Images", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 57: 841–52, (2010).
- [40] Kecheril, S.S., Venkataraman, D., Suganthi, J. and Sujathan, K., "Automated lung cancer detection by the analysis of glandular cells in sputum cytology images using scale space features", *Signal Image Video Process.*, 9: 851–63, (2013).
- [41] Kothari, S., Phan, J.H., Stokes, T.H. and Wang, M.D., "Pathology imaging informatics for quantitative analysis of whole-slide images", *J. Am. Med. Inform. Assoc.*, 20: 1099–108, (2013).
- [42] Ray, S. and Turi, R.H., "Determination of number of clusters in k-means clustering and application in colour image segmentation", *Proceedings of the 4th international conference on advances in pattern recognition and digital techniques*, Calcutta, India, 137–143, (1999).
- [43] <https://www.mathworks.com/help/images/color-based-segmentation-using-k-means-clustering.html>, "Color-Based Segmentation Using K-Means Clustering - MATLAB & Simulink Example", (2017).
- [44] He, L., Chao, Y. and Suzuki, K., "A Run-Based Two-Scan Labeling Algorithm", *IEEE Trans. Image Process.*, 17: 749–56, (2008).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Kule tipi yapıların dinamik davranışının belirlenmesi: Kırklareli Hızırbey Camii minaresi örneği

## *Determination of dynamic behaviour of tower type structures: the case of Kırklareli Hızırbey Mosque minaret*

*Yazar(lar) (Author(s)):* İsmail KILIÇ<sup>1</sup>, Kanat Burak BOZDOĞAN<sup>2</sup>, Süleyman AYDIN<sup>3</sup>, Saadet Gökçe GÖK<sup>4</sup>, Safiye GÜNDOĞAN<sup>5</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-5556-512X

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-7528-2418

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-2489-9906

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0002-7879-1610

ORCID<sup>5</sup>: 0000-0001-6672-4667

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Kılıç İ., Bozdoğan K. B., Aydın S., Gök S. G. ve Gündoğan S., “Kule tipi yapıların dinamik davranışının belirlenmesi: Kırklareli Hızırbey Camii minaresi örneği”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 19-26, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.481857

# Kule Tipi Yapıların Dinamik Davranışının Belirlenmesi: Kırklareli Hızırbey Camii Minaresi Örneği

*Araştırma Makalesi / Research Article*

İsmail KILIÇ<sup>1\*</sup>, Kanat Burak BOZDOĞAN<sup>2</sup>, Süleyman AYDIN<sup>3</sup>, Saadet Gökçe GÖK<sup>4</sup>, Safiye GÜNDOĞAN<sup>5</sup>

<sup>1,4,5</sup>Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Teknolojisi Programı, Kırklareli Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 08.11.2018 ; Kabul/Accepted : 08.02.2019)

## ÖZ

Yapıların deprem davranışları çeşitli dinamik parametreler kullanılarak belirlenmektedir. Bu parametreler yapının mevcut yapısal özelliklerine, malzeme özelliklerine, sınır şartlarına ve hasar durumuna bağlı olarak elde edilmektedir. Karmaşık yapısal dinamik problemleri çözmek için modal analiz inşaat mühendisliğinde kullanılan bir yöntemdir. Minare yapıları, uzun ve ince yığma yapılar olduğu için yanal yüklere karşı hassas yapılardır. Narinlik etkisi nedeniyle, şiddetli depremlerde bu yapılarda önemli hasarlar meydana gelmektedir. Sunulan çalışmada, Kırklareli ili Merkez ilçesinde yer alan ve 1383 yılında inşa edilmiş olan Hızırbey Camii minaresinin lineer dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Önceki dönemde restorasyon süreci geçiren Hızırbey Camii'nin, restorasyon raporundan yararlanılarak minare boyutları elde edilmiştir. Yapının duvarlarında kullanılan taş malzemeye yönelik çalışmalar kapsamında malzeme özellikleri belirlenmiştir. Söz konusu yapının tarihi değeri nedeniyle tahribatsız deney yöntemlerinde faydalanarak malzeme elastisite modülü tayin edilmiştir. Minarenin dinamik analizi, mod birleştirme yöntemi ile 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerine (DBYBHY 2007 ve TBDY 2018) göre SAP2000 yazılımı kullanılarak yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Minare yapısı prizmatik çubuk elemanlarla ve kabuk elemanlarla modellenmiş olup modellemelerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Minarenin temel periyodunun analitik olarak bulunması için ise Rayleigh yöntemini esas alan bir yaklaşımda çalışma kapsamında önerilmiştir. Çalışmanın sonunda TBDY 2018 yönetmeliğine göre elde edilen kuvvet ve yer değiştirmelerin DBYBHY 2007 yönetmeliğine oranla daha büyük değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çubuk eleman kabulüyle yapılan modellemenin kabuk elemanla modellemeye yakın değerler verdiği gözlenmiştir. Çalışmada önerilen Rayleigh yöntemi ile bulunan minarenin hakim periyodu, sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuca çok yakın olarak elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hızırbey Camii minaresi, dinamik analiz, kule yapısı, küfeki taşı.

## Determination of Dynamic Characteristics of Tower Type Structures: The Case of Kırklareli Hızırbey Mosque Minaret

### ABSTRACT

Seismic behavior of the structures is determined by using various dynamic parameters. The parameters are obtained depending on the existing structural characteristics of the structures, material properties, boundary conditions and damage condition. Modal analysis is a method used in civil engineering to solve complex structural dynamic problems. Minaret structures, because they are long and thin masonry structures, are sensitive to seismic effects. Due to its slenderness effect, significant damage to the structures occurs in severe earthquakes. In this study, linear dynamic analysis of the minaret of Hızırbey Mosque, which was built in 1383 at Kırklareli, was performed. The mosque is a restored structure, by using structural restoration report of the mosque, the dimensions of the minaret were determined. Studies on the stone-based construction material used on the walls of the structure, were carried out and material properties were determined. Due to the historical value of the mosque, nondestructive testing methods were used and modulus of elasticity of the material was obtained. The dynamic analysis of the minaret was performed in SAP2000 software by using mode superposition method in Turkish Earthquake Codes (TEC 2007 and TEC 2018). Furthermore, the minaret was modelled with prismatic frame elements and obtained results were compared to the results of shell element modeling. Within the scope of this study, an approach based on the Rayleigh method was proposed for the analytical evaluation of the fundamental period of the minaret. At the end of the study, it is seen that the force and displacement obtained according to the TEC 2018 is greater than TEC 2007. In addition, it was observed that modeling with frame elements gave close values to modeling with shell element. The fundamental period of the minaret with the Rayleigh method proposed in the study was found very close to the result obtained by the finite element method.

**Keywords:** Hızırbey Mosque minaret, dynamic analysis, tower-type structure, kufeki limestone.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : ismail.kilic@klu.edu.tr



## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mimari özellikleri ve statüyle çağımız mühendis ve mimarlarına yol gösteren tarihi yapıları korumak, kültürel mirasın gelecek nesillere aktarılması açısından önemlidir. Buna karşın deprem, savaş, yangın, ilgisizlik nedenlerine bağlı olarak birçok tarihi yapı yok olmakta veya yok olma seviyesine gelmiştir. Kültürel mirasın önemli örneklerinden olan tarihi yapıların mevcut yapısal güvenliklerinin belirlenerek elde edilen sonuçlara göre yapısal önlemlerin alınması gerekmektedir. Tarihi yapıların yapısal güvenliklerinin belirlenerek değerlendirilmesi ve koruma yöntemlerinin belirlenmesi disiplinlerarası bir çalışma gerektirir. Bu itibarla, tarihi yapıların kagir duvarlarında kullanılan taşların malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve analiz programlarında gerçek davranışı temsil edecek şekilde modellenmesi gerekmektedir.

Tarihi yapıların yapısal güvenliklerinin belirlenmesi ve koruma yöntemleri ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde; El-Attar vd. tarafından yapılan çalışmada, Mısır'da bulunan Memlükler döneminden kalma tarihi Manjaq Al-Yusufi minaresinin, sonlu elemanlar yöntemi ile kurulan modeli üzerinde dinamik analiz yapılarak sismik güçlendirme teknikleri önerilmiştir. Minarenin dinamik karakteristiklerini belirlemek için sismik ivmeölçerler kullanılarak çevresel titreşim testi yapılmış, sonrasında minarenin üç boyutlu sonlu elemanlar modelinin doğrulaması gerçekleştirilmiştir [1]. Mortezaei vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, İran'daki Jame Mescidi'nin yapısal davranışı incelenmiş olup analiz sonucunda minarenin hasar göreceği öngörülerek minarenin yeterli performans seviyesine ulaşabilmesi için kullanılabilecek güçlendirme teknikleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir [2]. Hejazi'nin çalışmasında, İran İsfahan'da bulunan ve klasik İran mimarisinde önemli yeri olan dokuz farklı tarihi yığma minare üzerinde analizler yapılarak yapısal özellikler belirlenmiş olup incelenen minarelerde deprem yüklemesi ve ısı etkisi altında hasar görebilecek kısımlar belirlenmiştir [3]. Abdel-Motaal minarelerin deprem davranışı üzerinde kazık temel etkilerini araştırdığı çalışmada kazık boyu ve özelliklerinin minarenin davranışını değiştirdiği belirtilmiştir [4]. Mirtaheri vd. İran Kaşan'da Selçuklu döneminde tamamen tuğladan inşa edilmiş olan tarihi Zeyned-din minaresinin dinamik karakteristiklerini sismik çevresel titreşim testi yöntemiyle belirlemiştir [5].

Yığma yapıların deprem güvenliklerinin belirlenmesi ve koruma yöntemleri ile ilgili çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Serhatoğlu vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Şehadet Camii minaresinin frekans, mod şekilleri ve sönüm oranı gibi dinamik parametreleri operasyonel modal analiz yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmada kalibre edilmiş sonlu elemanlar modelinin, minarenin davranışını yakın doğrulukta yansıttığı ifade edilmiştir [6]. Livaoğlu vd. çalışmalarında, Bursa'daki yedi adet tarihi yığma minareyi incelemek suretiyle minarelerin geometrik özelliklerinin dinamik davranışa etkisi incelenmiş ve sonuç olarak minarenin kesit

özellikleri ve yüksekliğinin dinamik davranışa olan etkisi belirlenmiştir [7].

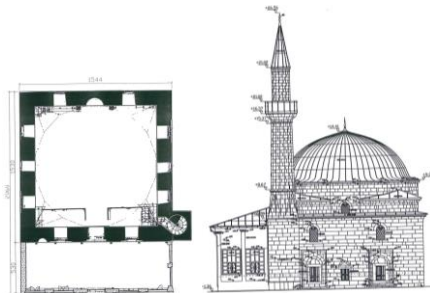
Tarihi yığma minarelerin sonlu eleman modeli oluşturularak teorik modal analizi, Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle de deneysel modal analizi gerçekleştirilerek mod şekilleri ve frekansları gibi modal parametreleri belirlenmektedir. Hacıfendioğlu vd. Samsun'da bulunan Büyük Camii'nin deneysel modal analizini gerçekleştirmiştir [8].

Ural ve Çelik, Aksaray il merkezinde bulunan yedi adet yığma minarenin sismik davranışını incelemiştir. Minarelerin geometrik ölçümleri fotogrametrik cihazlar kullanılarak yapılmış ve sonlu elemanlar metodu ile minareler modellenerek deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapısal analizler birbirleriyle karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır [9]. Hacıfendioğlu vd. zemin türlerinin betonarme minarenin dinamik davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için laboratuvar koşullarında inşa edilen betonarme minarenin modal testlerini gerçekleştirmiştir. [10]. Erdil vd. 2011 Van depreminde hasar gören Ulu Cami minaresinin hasar durumunu değerlendirmek, yapısal ve malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla bir saha araştırması yapmışlardır. Modal parametreleri belirlemek için operasyonel modal analizi yapılmış ve sonlu eleman modeli oluşturulmuştur [11]. Akan ve Özen, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak Bursa Yeşil Türbe'nin deprem analizini yapmışlar ve sonuç olarak bu tür yapılarda çekme gerilmelerini azaltacak önlemlerin alınması gerektiğini vurgulamışlardır [12]. Ertek ve Fahjan, Osmanlı döneminde inşa edilen minarelerin analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kabuk ve katı modelleme sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada sonuç olarak, katı elemanla yapılan modellemede elemanların moment aktarma özellikleri olmamasından dolayı diğer elemanlarla bağlantılarına dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır [13]. Beyen, çalışmasında 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde hasar gören, İstanbul'da bulunan Fatih Camisi'ni ele almış, titreşim verileri kullanarak caminin dinamik özellikleri ve mevcut yapısal durumunu incelemiş ve simetrik olarak teşkil edilmiş ve hiperstatiklik derecesi düşük olan bu tür yapıların çözümünde ana taşıyıcı yapı elemanların üzerinde oluşabilecek hasar için hâkim frekansın bir gösterge olabileceğini ifade etmiştir [14]. Dogangun vd. tarihi minarelerin dinamik davranışlarını incelemek üzere 20 m, 25 m ve 30 m yüksekliklerinde üç farklı minareyi modelleyerek minarelerin 1999 Kocaeli ve Düzce deprem kayıtları kullanarak dinamik analizlerini yapmışlar ve sonuç olarak özellikle eksenel ve eğilme gerilmelerinin üst geçiş bölgesinde en yüksek değerleri aldığı, kesme gerilmesi bakımından ise en yüksek değerlerin tabanda oluştuğunu vurgulamışlardır [15]. Celep vd. Muradiye Camii'nin yapısal ve deprem davranışının belirlenmesi amacıyla çalışma yapmışlardır. Çalışmanın sonunda yapılan analizlerden beklendiği gibi, düşey normal gerilmelerin duvarların tepesinden aşağıya doğru arttığı ve maksimum değerlerin duvarın tabanında oluştuğu görülmüştür. Çalışmada güçlendirme

yöntemi olarak mikro kazık yaklaşımı önerilmiştir [16]. Türk vd. İstanbul'da bulunan tarihi bir caminin yığma taş minaresinin dinamik analizini yaparak analiz sonucunda lifli polimer ile güçlendirme önermişlerdir [17]. Sezen ve Dogangun, tarihi yapıların yapım teknikleri ve malzemelerini anlatarak 1999 Kocaeli depreminde minarelerin geçiş bölgelerinde oluşan gerilmeler nedeniyle hasar gördüklerini belirlemişlerdir [18]. Dogangun ve Sezen, Bolu ve Düzce'deki 1999 Kocaeli depreminde hasar gören beş ayrı tarihi caminin sismik hasar değerlendirmesini yapmışlardır [19]. Turk, İstanbul'da bulunan tarihi bir camiye ait yığma taş minarenin dinamik analizi ile mevcut durumunu belirleyerek kritik kesitlerin lif takviyeli çimentolu matris malzeme ile güçlendirilmesini önermiştir [20].

## 2. KIRKLARELİ HIZIRBEY CAMİİ'NİN MİMARİ VE YAPISAL ÖZELLİKLERİ (ARCHITECTURAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF KIRKLARELİ HIZIRBEY MOSQUE)

Kırklareli merkezde konumlanan Hızır Bey Camii, 1383 (H.785) yılında Köse Mihalzade Hızır Bey tarafından yaptırılmış, kare planlı bir yapıdır. Duvarların dış yüzleri, kubbe kasağı ve minaresi düzgün yonu küfeki taşından imal edilmiştir. 1470 m<sup>2</sup> arsa üzerinde 15 m × 15 m ebatlarında temel üzerine oturmuş, 328 m<sup>2</sup>'lik iç alana sahip olarak aynı anda 1000 kişinin ibadet edebileceği kapasiteye sahiptir [21]. Deprem sonucu yıkılan ve cami inşasından daha sonra yapılmış olan dikdörtgen planlı son cemaat yeri, Aydoslu Hacı Yusuf Paşa tarafından 1824 yılında onarılmıştır. Tosunoğlu Ali Efendi tarafından 1887 yılında bir onarım daha geçirmiştir. Minaresi kesme taş ve tek şerefeli, kütük kare ve külâh kurşunludur. Balkan savaşında Bulgarlar tarafından yarıya kadar yıkılan minaresi tekrar yapılmıştır. Büyük Cami olarak da bilinen, ibadete açık olan yapı, 2007 yılında Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından restorasyon çalışması yapılmıştır. Zengin kalem işi süslemeleri ile erken Osmanlı dönemi yapısıdır. İç duvarlarını süsleyen büyük harfli yazılar Kastamonulu Hattat Tevfik tarafından yazılmıştır. Hızır Bey Camii temel boyutlarıyla Kâbe-i Muazzama'ya benzemektedir [22]. Edirne Vakıflar Bölge Müdürlüğü arşivinden temin edilen Hızır Bey Camii'nin planı ve sol yan (batı) görünüşü Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Caminin kat planı ve sol yan (batı) görünüşü (Story plan and Western facade of the mosque) [22]

## 3. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Çalışma kapsamında, Hızır Bey Camii minaresinin deprem yükleri altında dinamik özellikleri belirlenmiştir. Hızır Bey Camii, Kırklareli ili merkezinde bulunan kalker esaslı malzeme (küfeki taşı) kullanılarak inşa edilmiş yığma bir yapıdır. Kırklareli ili, coğrafi konum itibarıyla Marmara Bölgesi'nin Trakya kesiminde yer almaktadır. Istranca dağları ve Ergene nehri arasında kalan bu sınır ili, DBYBHY 2007'ye göre dördüncü derece deprem bölgesinde bulunmaktadır [23].

Yapısal analizin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan malzeme özellikleri belirlenmiştir. Elastisite modülü değeri, tahribatlı deney yöntemleriyle doğrudan belirlenebilirken, caminin tarihi niteliği nedeniyle malzeme örneği alınarak bu deneylerin gerçekleştirilmesi mümkün olmamıştır. Bu nedenle, Pundit PL200 (Ultrasonik darbe hızı test cihazı) kullanılmıştır. Test cihazı malzemelerin homojenliğini değerlendirebilmekte, çatlakları algılayabilmekte, darbe hızını hesaplayabilmekte ve darbe hızı korelasyonu kullanılarak basınç dayanımını belirleyebilmektedir. Bunların yanında malzemenin elastisite modülünü tespit edebilmektedir. Elastisite modülü tespiti için önce 54 kHz duyargalar ile P-dalgası ölçümü daha sonra 250 kHz duyargalar ile S-dalgası ölçümü yapılmaktadır. P ve S dalgası ölçümleri yapıldıktan sonra cihaz elastisite modülü değerini vermektedir. Cami minaresinin taş duvarlarında bu yöntemle ölçümler yapılmış ve küfeki taşının elastisite modülü belirlenmiştir. Minare duvarlarının kesme küfeki taşı ile örülmesi ve derz kalınlıklarının az olmasından dolayı elastisite modülü tespitinde harç etkisi dikkate alınmamıştır.

Küfeki taşı, deniz kabuklarının çoğunlukla da istiridyeye kabuklarının oluşturduğu bir kalker türüdür. Bakırköy taşı, lümaşelli kalker ve maktrali kalker olarak da adlandırılmaktadır. İçeriğinde büyük miktarda fosil bulunmakta olup, boşluklu ve kalsit özellikli bir dokusu vardır. Açık bej-beyaz tonlarında, ince taneli ve kumlu görünümde, kompakt bir kayaç olup kolay işlenebilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Kimyasal bileşiminde asgari %90 oranında kalsiyum karbonat, mineralojik bileşiminde asgari %90 oranında kalsit minerali bulunduran kayaçlar, kalker ya da kireçtaşı olarak adlandırılmakta olup kireçtaşının birim hacim ağırlığı 2,5-2,7 g/cm<sup>3</sup> arasında değişmektedir [24]. Trabzon ili civarında yer alan kaya birimleri mühendislik jeolojisi açısından değerlendirildiğinde, bu bölgedeki kireçtaşının özgül ağırlığı ortalama 2,82 g/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir [25]. TS 11137'de kireçtaşı için verilen alt limit birim hacim ağırlık değeri 2,16 g/cm<sup>3</sup> olarak belirtilmiştir [26]. Literatürde, kalsiyum karbonatlı kayaçların standart özelliklerinin incelendiği bir çalışmada, kireçtaşı olarak sınıflandırılan kayaçlarda pas tehlikesi olduğu, açık hava etkilerine maruz kaldığında renk değişimi gözlemlendiği belirlenmiştir [27].

Küfeki taşı, hafifliği sayesinde nakliye kolaylığı sağlarken yüksek hızda üretim yapılabilmesine olanak

sağlamaktadır. Bununla birlikte kesme kolaylığı, istenen boyutlarda yapı taşı üretilebilmesini ve kullanım çeşitliliği sağlamaktadır. Kimyasal yapısında bulunan kalsiyum karbonat, ortamdaki karbondioksit ile tepkimeye girerek zamanla basınç dayanımında, elastisite modülünde ve çekme dayanımında artış sağlanarak beraber permeabilite, klor difüzyonu ve su geçirgenliğinde azalma oluşturmaktadır [28]. Erzurum Lala Paşa Camisi'nin incelendiği bir çalışmada, yapı elemanlarının mekanik özellikleri Çizelge 1'de gösterilmiştir [29]. Taş malzeme kullanılarak inşa edilen Coşandere (Kınalı) köprüsünün sonlu eleman yöntemiyle analizinde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 2'de verilmektedir [30].

**Çizelge 1.** Erzurum Lala Paşa Camii'nin malzeme mekanik özellikleri (The mechanical properties of materials used in Erzurum Lala Pasha Mosque) [29]

Cami bölümü	Elastisite modülü (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)
Duvarlar	3,92	0,3
Fil ayakları ve kemerler	5,63	0,3
Kubbeler	3,00	0,3

**Çizelge 2.** Coşandere (Kınalı) köprüsü taş malzeme özellikleri (Material properties of the stone used in Cosandere-Kınalı Bridge) [30]

Malzeme	Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı
Yan duvar	2,5	0,20
Dolgu	1,5	0,05
Taş kemer	3,0	0,20

Hızırbey Camii minare duvarları incelenmiş ve duvarda kullanılan taş türünün küfeki taşı (fosilli kalker) olduğu tespit edilmiştir. Literatür çalışmalarından yararlanılarak küfeki taşının birim hacim ağırlık değeri  $2,55 \text{ g/cm}^3$  olarak belirlenmiştir. Pundit PL200 (Ultrasonik Darbe Hızı Test Cihazı) ile Hızırbey Camii minaresinin taş duvarlarında ölçümler yapılmış ve taş malzemenin elastisite modülünün 4-6 GPa aralığında değerler aldığı tespit edilmiştir. Cami minaresinde kullanılan küfeki taşının elastisite modülü değeri analizlerde 5 GPa olarak kullanılmıştır. Hızırbey Camii minaresine ait ölçüler, Edirne Vakıflar Bölge Müdürlüğü arşivinden temin edilen Kırklareli Hızırbey Camii Rölöve-Restitüsyon-Restorasyon raporundaki rölöve çizimlerinden alınmıştır. Çizimlerden belirlenemeyen ölçüler ise minare üzerinden ve içerisinden lazermetre yardımıyla yerinde tespit edilmiştir. Ölçme imkânı olmayan kısımlarda ise yaklaşık değer kabul edilmiştir. Elde edilen veriler

doğrultusunda SAP2000 [31] yazılımı kullanılarak Hızırbey Camii minaresinin dinamik analizi yapılmıştır.

#### 4. MİNARENİN DİNAMİK ANALİZİ (DYNAMIC ANALYSIS OF THE MINARET)

Hızırbey Camii minaresinin dinamik analizi, lineer analizde zaman tanım alanında analize yakın sonuç veren, geçerliliği kabul gören ve yaygın olarak kullanılan mod birleştirme yöntemine göre SAP2000 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Mod birleştirme yöntemine göre dinamik analiz gerek DBYBHY 2007 gerekse TBDY 2018 [32] yönetmeliklerine uygun olarak yapılmıştır. Analizlerde yapı geometrisi nedeniyle x ve y doğrultuları için elde edilen deplasman ve iç kuvvet değerleri aynı olarak elde edilmiş olup bu nedenle yalnızca x doğrultusu sonuçları verilmiştir.

Minarenin konumlandığı zemin sınıfının belirlenmesi için Nitelik Mühendislik İnşaat ve Gıda San. Tic. Ltd. Şirketinin katkıları ile yüzey Dalgası Analiz Yöntemi (MASW) kullanılmıştır. Yapılan geoteknik analizlerden üst 30 m'deki kayma dalgası hızı  $V_{s30}=592 \text{ m/s}$  olarak bulunmuştur. Elde edilen bu verilerden DBYBHY 2007 yönetmeliğine göre zemin sınıfı Z2 olarak belirlenirken TDY 2018 Yönetmeliğine göre zemin sınıfı ZC olarak tespit edilmiştir.

Minarenin DBYBHY 2007 Yönetmeliği esas alınarak gerçekleştirilen dinamik analizinde esas alınan parametreler Çizelge 3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.** DBYBHY 2007 Yönetmeliğine göre spektral analiz parametreleri (Spectral analysis parameters based on TEC 2007)

Etkin ivme katsayısı ( $A_0$ )	0,1
Bina önem katsayısı (I)	1
Zemin sınıfı	Z2
Taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R)	2

TBDY 2018'e göre yapılan analizlerde Kırklareli merkezi için dikkate alınan parametreler Çizelge 4'te sunulmuştur. Minarenin analizinde çatlamış kesit rijitliği kullanılmış olup eğilme ve kayma rijitliği değerleri 0,5 ile azaltılarak hesaplarda dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında yalnızca yatay tepki spektrumu kullanılmış olup düşey tepki spektrumunun etkisinin ihmal edilebilecek mertebede olması nedeniyle analizlerde bu etki dikkate alınmamıştır.

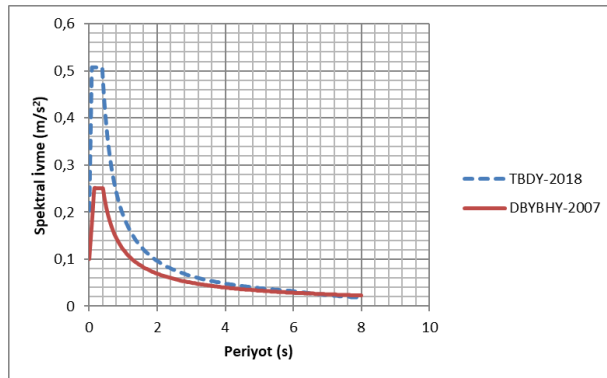
DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 deprem yönetmeliklerine ait elastik tasarım spektrumları Şekil 2'de verilmiştir.

Minarenin analizinde elastisite modülü yerinde yapılan ölçümler baz alınarak 5 GPa olarak alınmıştır. Birim hacim ağırlığı ve Poisson oranı literatürdeki değerlere uygun olarak  $25,5 \text{ kN/m}^3$  ve 0,2 şeklinde dikkate alınmıştır [13]. Modellemede merdivenin etkisi de dikkate alınarak merdivenin ağırlığı yayılı kütle olarak

minareye etkilmiştir. Merdivenli ve merdivensiz olarak yapılan çözümlerden merdivenin dinamik analize etkisinin sınırlı seviyede olduğu değerlendirilmiştir. Minare modellenirken doğrusal analizde yeterli uygunlukta sonuçlar veren ve tüm yapının homojen anizotropik olarak kabul edildiği makro modelleme tekniği kullanılmıştır. Bu itibarla makro modelleme kullanılarak analiz süresi kısaltılmaktadır. Analizlerde malzemenin lineer olduğu ve geometrik nonlineer etkilerin ihmal edilebileceği kabulleri yapılmıştır. Analizlerde kabuk eleman modeli ile birlikte çubuk eleman modeli de kullanılarak çubuk elemanla modellemenin uygunluğu da araştırılmıştır. Ayrıca minarenin temel periyodu Rayleigh yöntemi ile analitik olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 4.** TBDY 2018'e göre spektral analiz parametreleri (Spectral analysis parameters based on TEC 2018)

Zemin sınıfı	ZC
Kısa periyot bölgesi için harita spektral ivme katsayısı ( $S_s$ )	0,388
1,0 saniye periyot bölgesi için harita spektral ivme katsayısı ( $S_1$ )	0,128
En büyük zemin ivmesi (PGA)	0,165
Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı ( $F_s$ )	1,3
1,0 saniye periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı ( $F_1$ )	1,5
Kısa periyot bölgesi için tasarım spektral ivme katsayısı ( $S_{DS}$ )	0,504
1,0 saniye periyot bölgesi için tasarım spektral ivme katsayısı ( $S_{D1}$ )	0,192
Taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R)	2



**Şekil 2.** TBDY 2018 ve DBYBHY 2007'ye göre elastik tasarım spektrumları (Elastic design spectra according to TEC 2018 and TEC 2007)

#### 4.1 Minarenin Kabuk Elemanlar Kullanılarak Dinamik Analizi (Dynamic Analysis of the Minaret by using Shell Elements)

Literatürde yapılan çalışmada minarelerin doğrusal analizinde, kabuk elemanla modelleme sonucu elde edilen değerlerin, katı eleman kullanılması durumunda

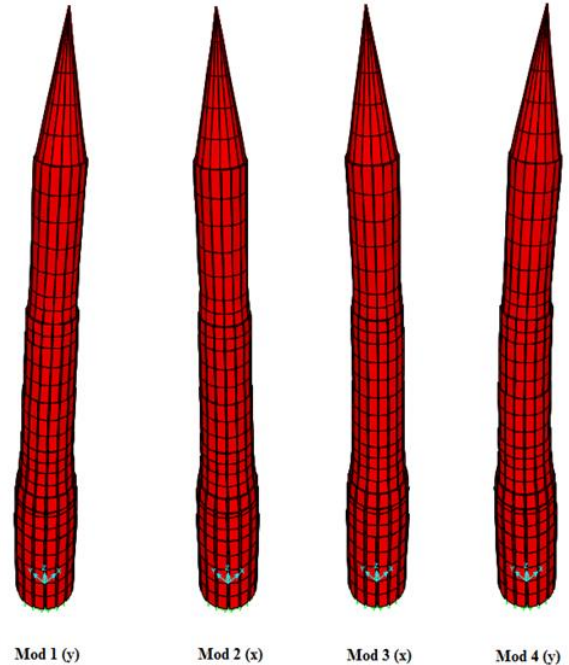
elde edilen değerlere yakın olduğu görülmüştür [13]. Bu çalışmada katı elemana oranla modellemesi daha kolay olan kabuk (shell) elemanlar kullanılmıştır. Modelleme sırasında yapı toplam 528 kabuk (shell) elemana bölünmüş olup minarenin toplam ağırlığı 1604,7 kN olarak hesaplanmıştır.

Minarenin periyotları çatlamamış ve çatlamış kesit dikkate alınarak SAP2000 yazılımı yardımıyla hesaplanarak Çizelge 5'te sunulmuştur.

**Çizelge 5.** Minarenin ilk dört periyodu (First four periods of the minaret)

Mod	Doğrultu	Periyot T(s) (Çatlamamış kesit kabulünde)	Periyot T(s) (Çatlamış kesit kabulünde)
1	y	0,39	0,56
2	x	0,39	0,56
3	y	0,13	0,18
4	x	0,13	0,18

Minarenin mod şekilleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Analizlerden elde edilen tepe noktası yer değiştirmesi ve taban kesme kuvveti değerleri Çizelge 6'da sunulmuştur. Analizlerde yapı geometrisi nedeniyle x, y doğrultusu için elde edilen deplasman ve iç kuvvet değerleri aynı olarak elde edilmiş olup bu nedenle yalnızca x doğrultusu sonuçları verilmiştir.



**Şekil 3.** Cami minaresinin mod şekilleri (Mode shapes of the mosque minaret)

Elde edilen gerilmeler ise Çizelge 7'de verilmiştir. Burada S11 ve S22 düşey gerilmeleri, S12, S13 ve S23 ise kayma gerilmelerini göstermektedir.

**Çizelge 6.** DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 deprem yönetmeliklerine göre elde edilen tepe noktası deplasmanı ve taban kesme kuvvet değerleri (Peak point displacement and base shear force values obtained with TEC 2007 and TEC 2018)

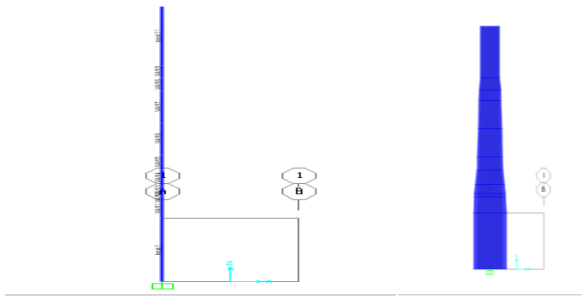
	X doğrultusu	
	DBYBHY (2007)	TBDY (2018)
Tepe noktası deplasmanı	14 mm	40 mm
Taban kesme kuvveti	86,8 kN	142,7 kN

**Çizelge 7.** 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre elde edilen maksimum gerilme değerleri (Maximum stress values obtained with TEC 2007 and TEC 2018)

	Gerilmeler (MPa)	
	DBYBHY 2007	TBDY 2018
S11	0,098	0,140
S22	0,490	0,700
S12	0,056	0,091
S13	0,004	0,007
S23	0,025	0,042

#### 4.2 Minarenin Çubuk Elemanlar Kullanılarak Dinamik Analizi (Dynamic Analysis of the Minaret by using Frame Elements)

Minare SAP2000’de prizmatik olmayan çubuk elemanlar (nonprismatic frame elements) kullanılarak modellenmiştir (Şekil 4).



**Şekil 4.** Prizmatik olmayan çubuk elemanlarla modelleme görüntüsü (Modelling using nonprismatic frame elements)

Çubuk elemanlarla modellemede minarenin periyotları çatlamamış ve çatlamış kesit dikkate alınarak hesaplanmış ve Çizelge 8’de sunulmuştur.

Prizmatik çubuk elemanlarla modellemeden elde edilen tepe noktası deplasmanı ve taban kesme kuvveti değerleri ise Çizelge 9’da verilmiştir.

**Çizelge 8.** Çubuk elemanla modellemede minarenin ilk dört periyodu [s] (First four periods of the minaret)

Mod	Doğrultu	Periyot, T(s) (Çatlamamış kesit kabulünde)	Periyot, T(s) (Çatlamış kesit kabulünde)
1	y	0,39	0,55
2	x	0,39	0,55
3	y	0,13	0,19
4	x	0,13	0,19

**Çizelge 9.** Prizmatik çubuk elemanlarla modellemede 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre elde edilen deplasman ve taban kesme kuvvet değerleri (Peak point displacement and base shear force values obtained by using prismatic frame elements model according to TEC 2007 and TEC 2018)

	X doğrultusu	
	DBYBHY (2007)	TBDY (2018)
Tepe noktası yer değiştirmesi	14,4 mm	42 mm
Taban kesme kuvveti	89,3 kN	151,6 kN

#### 4.3 Rayleigh Yöntemi Kullanılarak Minarenin Hâkim Periyodunun Hesaplanması (Determination of Fundamental Period of the Minaret by using Rayleigh Method)

Rayleigh yöntemi ile minarenin hâkim periyodu Dnk. 1 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada minare, literatüre uygun olarak eşdeğer bir Timoshenko kirişi olarak modellenmiş olup bu durumda Dnk. 2-11 yazılabilir [33]:

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1)$$

Burada  $\omega$ , açısal frekansı göstermekte olup Dnk. 2 ile bulunur.

$$\omega^2 = \frac{\omega_e^2 \omega_k^2}{\omega_e^2 + \omega_k^2} \quad (2)$$

Burada  $\omega_e$  salt eğilme deformasyonlarından hesaplanan açısal frekansı,  $\omega_k$  ise salt kayma deformasyonlarından hesaplanan açısal frekansı göstermekte olup (3) ve (4) bağıntıları ile hesaplanabilir:

$$\omega_e^2 = \frac{\int_0^1 EI(\varepsilon) \left(\frac{d^2 y_e}{d\varepsilon^2}\right)^2}{H^4 \int_0^1 \rho A(\varepsilon) y_e^2} \quad (3)$$

$$\omega_k^2 = \frac{\int_0^1 kGA(\varepsilon) \left(\frac{dy_k}{d\varepsilon}\right)^2}{H^2 \int_0^1 \rho A(\varepsilon) y_k^2} \quad (4)$$

Burada  $E$  elastisite modülünü,  $G$  kayma modülünü,  $I(\varepsilon)$  atalet momenti fonksiyonunu,  $A(\varepsilon)$  kesit alanını,  $k$  kayma şekil faktörünü göstermektedir. Sırasıyla  $y_e$  ve  $y_k$  salt eğilme ve salt kayma deformasyonlarından oluşan 1. mod

şeklini göstermekte olup yaklaşık olarak Dnk. 5 ve 6'daki gibi kabul edilebilir [37]:

$$y_e = 1 - \cos\left(\frac{\pi\varepsilon}{2}\right) \quad (5)$$

$$y_k = \sin\left(\frac{\pi\varepsilon}{2}\right) \quad (6)$$

Burada  $\varepsilon$ , Dnk. 7 ile tanımlanır:

$$\varepsilon = \frac{z}{H} \quad (7)$$

Burada  $z$ , minarenin yüksekliği boyunca değişimini ve  $H$  minarenin toplam yüksekliğini göstermektedir. Bu çalışmada atalet momenti ve kesit alanının yapı yüksekliği boyunca parabolik ve kübik olarak değişimi durumları dikkate alınmış olup Dnk. 8-11'de sunulmuştur:

$$I(\varepsilon) = I(0)\left[1 - \left(1 - \frac{I(H)}{I(0)}\right)\varepsilon^2\right] \quad (8)$$

$$A(\varepsilon) = A(0)\left[1 - \left(1 - \frac{A(H)}{A(0)}\right)\varepsilon^2\right] \quad (9)$$

$$I(\varepsilon) = I(0)\left[1 - \left(1 - \frac{I(H)}{I(0)}\right)\varepsilon^3\right] \quad (10)$$

$$A(\varepsilon) = A(0)\left[1 - \left(1 - \frac{A(H)}{A(0)}\right)\varepsilon^3\right] \quad (11)$$

Burada  $I(0)$  ve  $A(0)$  tabandaki atalet ve kesit alanını,  $I(H)$  ve  $A(H)$  ise tepe noktasındaki atalet momenti ve kesit alanını göstermektedir. Dnk. 1-11 bağımlıları kullanılarak parabolik ve kübik değişim kabulleri için temel periyot değerleri hesaplanmıştır. Rayleigh yöntemi ile atalet momenti ve kesit alanının parabolik ve kübik olarak değişmesi durumları için bulunan çatlama ve çatlama kesit temel periyot değerleri Çizelge 10'da verilmiştir.

**Çizelge 10.** Rayleigh yöntemi ile bulunan temel periyot [s]  
(Fundamental period obtained using Rayleigh method)

Değişim kabulü	Periyot, T(s) (Çatlama kesit kabulünde)	Periyot, T(s) (Çatlamış kesit kabulünde)
Parabolik	0,36	0,51
Kübik	0,38	0,54

## 5. BULGULAR (RESULTS)

Çalışmada incelenen minare önce kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiş, daha sonra ise prizmatik çubuk elemanlarla modellenmiştir. İki modelleme sonucu elde edilen sonuçların oldukça yakın olduğu görülmektedir. TBDY 2018'e göre tepe noktası deplasmanı kabuk elemanlarla modellemede 40 mm bulunurken çubuk elemanlarla modellemede 42 mm olarak elde edilmiştir. Taban kesme kuvvetleri karşılaştırıldığında ise kabuk elemanlarla modellemede 142,7 kN bulunurken, çubuk elemanlarla modellemede bu değer 151,6 kN olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar çubuk elemanlar kullanılarak yapılan modellemenin yapının dinamik analizinin belirlenmesinde ön bilgi verme amacıyla kullanılabilirliğini göstermektedir.

Çalışmada önerilen Rayleigh yöntemi ile ise minarenin hâkim periyodu doğruya yakın yaklaşıklıkla elde

edilmektedir. Bu tür yaklaşık yöntemlerin özellikle az bir parametre ile yapı davranışının anlaşılması açısından yararlı olduğu değerlendirilmiştir.

2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında 2018 deprem yönetmeliğinden elde edilen değerlerin daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Örneğin kabuk elemanla modelleme baz alınarak taban kesme kuvveti değerleri karşılaştırılırsa 2018 deprem yönetmeliğine göre elde edilen taban kesme kuvveti değerinin 2007 deprem yönetmeliğine göre elde edilen taban kesme kuvveti değerinin 1,64 katı olduğu görülmektedir. Tepe noktası deplasman sınırı olarak kabul edilen  $H/500$  oranı kabul edilirse toplam minare yüksekliği 25,88 m olduğundan sınır değer 52 mm olmaktadır. Çalışmada bulunan tepe noktası deplasmanı değerleri bu sınıram altında kalmaktadır.

Elde edilen çekme gerilmelerine bakıldığında, Çizelge 7'de sunulan çekme gerilmelerinin literatürde [9] minareler için çekme emniyet gerilmesi kabul edilen 0,4 MPa değerini aştığı görülmektedir.

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Sunulan çalışmada Kırklareli ilinde bulunan tarihi Hızırbey Camii minaresinin malzeme ve mekanik özellikleri yerinde yapılan ölçümlerle belirlenmiş ve bu veriler esas alınarak minarenin dinamik parametreleri SAP2000 yazılımı kullanılarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar çözümlemesinde iki farklı eleman türü kullanılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Minarenin dinamik analizi, spektral analiz yöntemi kullanılarak DBYBHY 2007 ve TBDY 2018'e göre yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda kabuk eleman kullanıldığı durum için tepe noktası deplasmanının, TBDY 2018'de DBYBHY (2007)'ye göre 2,86 kat fazla çıktığı görülmüştür. Ayrıca taban kesme kuvvetinin ise kabuk elemanla modelleme sonucunda TBDY 2018'de, DBYBHY 2007'ye göre 1,64 kat fazla elde edildiği belirlenmiştir. Yapılan analizlerden çubuk elemanla modelleme ile elde edilen sonuçların kabuk elemanla modelleme ile elde edilen sonuçlara çok yakın olduğu gözlenmiştir. Çalışma kapsamında temel periyodun Rayleigh yöntemi ile pratik bir şekilde bulunması için de bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşım ile elde edilen temel periyot değeri sonlu elemanlar ile analizle elde edilen temel periyoda çok yakın sonuç vermiştir. Sonuç itibarıyla, gerçekleştirilen bu çalışmada yapılan analizler doğrusal davranışı esas almaktadır. Minarenin olası bir büyük depremdaki davranışı için doğrusal olmayan analizlerin yapılması gerekmektedir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

KLÜBAP-110 numaralı "Kırklareli Hızırbey Camii'nin Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi" adlı proje çalışmamızı destekleyen Kırklareli Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürlerimizi sunarız.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] El-Attar, A. G., Saleh, A. M., Zaghaw, A. H., "Conservation of a slender historical Mamluk-style minaret by passive control techniques", *Structural Control and Health Monitoring*, 12: 157–177, (2005).
- [2] Mortezaei, A., Kheyroddin, A., Ronagh, H.R., "Finite element analysis and seismic rehabilitation of a 1000-year-old heritage listed tall masonry mosque", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(5), 334–353, (2012).
- [3] Hejazi, M., Moayedian, S.M., Daei, M., "Structural Analysis of Persian Historical Brick Masonry Minarets", *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, 27(1), (2016).
- [4] Abdel-Motaal, M.A., "Effect of piles on the seismic response of mosques minarets", *Ain Shams Engineering Journal*, 5(1), 29–40, (2014).
- [5] Mirtaheri, M., Abbasi, A., Salari, N., "A seismic behavior and rehabilitation of the historic masonry minaret by experimental and numerical methods", *Asian Journal of Civil Engineering*, 18(5), 807–822, (2017).
- [6] Serhatoğlu, C., Livaoglu, R., Bağbancı, B., "Dynamic Identification of Monumental and Historical Minaret of the Sehadet", *6<sup>th</sup> International Operational Modal Analysis Conference*, Gijón - Spain, (2015).
- [7] Livaoglu, R., Baştürk, M. H., Doğangün, A., Serhatoğlu, C., "Effect of geometric properties on dynamic behavior of historic masonry minaret", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20: 2392–2402, (2016).
- [8] Hacıfendioğlu, K., Demir, G., Alpaslan, E., "Determination of Modal Parameters of Historical Masonry Minarets by using Operational Modal Analysis", *Proceedings of the World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'16)*, Prague, Czech Republic, (2016).
- [9] Ural, A., Celik, T., "Dynamic Analyses and Seismic Behavior of Masonry Minarets with single Balcony", *Aksaray University Journal of Science and Engineering*, 2(1), 13–27, (2018).
- [10] Hacıfendioğlu, K., Alpaslan, E., Demir, G., Dinç, B., Birinci, F., "Experimental modal investigation of scaled minaret embedded in different soil types", *Gradjevinar*, 70, (2018).
- [11] Erdil, B., Tapan, M., Akkaya, İ., Korkut, F., "Effects of structural parameters on seismic behaviour of historical masonry minaret", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62: 148–161, (2018).
- [12] Akan, A.E., Özen, Ö., "Bursa Yeşil Türbe'nin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Deprem Analizi", *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, 758–762, (2005).
- [13] Ertek, E., Fahjan, Y., "Osmanlı Minareleri Yapısal Sistemleri: Sınıflandırma, Modelleme ve Analizi", *Altuncu Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 16-20 Ekim, İstanbul, 49–60, (2007).
- [14] Beyen, K., "17 Ağustos 1999 Kocaeli Depreminde Hasar Alan Fatih Camii'nin Dinamik Karakteristiklerinin Tanımlanması", *Altuncu Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 16-20 Ekim, İstanbul, 49–60, (2007).
- [15] Dogangun, A., Acar, R., Sezen, H., Livaoglu, R., "Investigation of dynamic response of masonry minaret structures", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6:505–517, (2008).
- [16] Celep, Z., İncecik, M., Pakdamar, F., "Structural and earthquake response analysis of the Muradiye Mosque", *International Conference of Cuma Mosque Plovdiv*, Plovdiv, 7 June, (2008).
- [17] Turk, A.M., Cosgun, C., "Seismic Behaviour and Retrofit of Historic Masonry Minaret", *Gradevinar*, 64, 39–45, (2012).
- [18] Sezen, H., Dogangun, A., "Seismic Performance of Historical and Monumental Structures", *Earthquake Engineering*: 181–202, (2012).
- [19] Dogangun, A., Sezen, H., "Seismic vulnerability and preservation of historical masonry monumental structures", *Earthquake and Structures*, 3(1): 83–95, (2012).
- [20] Turk, A.M., "Seismic response analysis of masonry minaret and possible strengthening by fiber reinforced cementitious matrix (FRCM) materials", *Advances in Materials Science and Engineering*, (2013).
- [21] Kırklareli Kültür Varlıkları Envanteri, Erişim: 18.10.2018  
<http://www.kirklarelienvanteri.gov.tr/anitlar.php?id=311>
- [22] Edirne Vakıflar Bölge Müdürlüğü, "Kırklareli Hızırbey Cami Rölöve-Restitüsyon-Restorasyon Raporu", (2007).
- [23] DBYBHY, "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik", Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, (2007).
- [24] Limak Batı Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş., "200901721 Ruhsat Nolu Kalker Ocağı Proje Tanıtım Dosyası", (2013).
- [25] Koca, M.Y., Arslan, A.T., Tarhan, F., "Zigana Tüneli–Gürgenagaç (Trabzon) Arasında Yer Alan Kaya Birimlerinin Mühendislik Jeolojisi Açısından Değerlendirilmesi" *Dokuz Eylül Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(2): 57–73, (2005).
- [26] TS 11137, "Kireçtaşı (Kalker)-Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan", TSE, Ankara, (1993).
- [27] Teymen, A., Kılıç, A., Türkmenoğlu, Z.F., "Kalsiyum Karbonatlı Kayaçların Standart Özelliklerinin İncelenmesi", *Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi*, 259–270, (2011).
- [28] Arıoğlu, N., Arıoğlu, E., "Mimar Sinan'ın Seçtiği Taş: Küfeki ve Çekme Dayanımı", *14. Türkiye İnşaat Mühendisliği Teknik Kongresi*, İzmir, 1021–1034, (1997).
- [29] Kocaman, İ., Okuyucu, D., Kazaz, İ., "Tarihi Yığma Yapıların Dinamik Davranışlarının Hesabında Gerekli Malzeme Özelliklerinin Tayini : Lala Paşa Cami Örneği", *Uluslararası Katımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu*, 113–122, (2017).
- [30] Ural, A., "Tarihi Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Metoduyla Analizi", *Deprem Sempozyumu*, 408–413, (2005).
- [31] SAP2000, "Structural Software for Analysis and Design, Evaluation Version", *Computers and Structures*, (2018).
- [32] TBDY 2018, "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği", AFAD, (2018).
- [33] Dym, C. L., Williams, H. E., "Analytical Estimates of Structural Behavior", *CRC press Boca Raton*, (2012).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



**Bakır ve pirinç talaşları ile takviye edilmiş boru bağlantı elemanlarının iki farklı üretim türü için (SEC) özel enerji tüketim modeli**

*Specific energy consumption (SEC) model for types of two different production of fittings which is reinforced by chips of copper and brass*

*Yazarlar (Authors): Burak ÖZTÜRK<sup>1</sup>, Özkan KÜÇÜK<sup>2</sup>*

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-1018-6545

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-4337-4454

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Öztürk B., ve Küçük Ö., “Bakır ve pirinç talaşı ile takviye edilmiş boru bağlantı elemanlarının iki farklı üretim türü için (SEC) Özel enerji tüketim modeli”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 27-35, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.473105



# Bakır ve Pirinç Talaşı ile Takviye Edilmiş Boru Bağlantı Elemanlarının İki Farklı Üretim Türü için (SEC) Özel Enerji Tüketim Modeli

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Burak ÖZTÜRK<sup>1\*</sup>, Özkan KÜÇÜK**

Bilecik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, Bilecik, Türkiye

(Geliş/Received : 22.10.2018 ; Kabul/Accepted : 16.03.2019)

## ÖZ

TS 11 EN 10242 Standartlara uygun ölçülerde ve geometrilere üretilen boru bağlantı elemanlarının (fittings); havacılık, otomotiv ve makine üretimi gibi önemli alanlar başta olmak üzere, bina içi doğalgaz ve su tesisatlarına kadar birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fittings malzemelere tek seferde diş açma işlemi, genelde CNC Freze tezgâhlarında ve özel diş açma makinelerinde yapılmaktadır. Ayrıca universal torna tezgâhlarında da kademeli diş açma işlemi ile de fittings malzemeler üretilmektedir. Özellikle Amerika ve Hindistan'da otomotiv sektörü ve makine ekipmanları için üretilen alüminyum alaşımlı fittings malzemeler, bu çalışmada hurda pirinç ve bakır talaşıyla belirli oranda alaşımlandırılmıştır. Literatürde ilk defa boru bağlantı elemanlarının, endüstride seri üretim koşulları dikkate alınarak, CNC Freze'de kılavuzla diş açma ve tornada kademeli diş açma işlemleri ile yapılmış ve karşılaştırılabilir olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, parametre olarak devir sayısı, alaşım tipi ve tezgah türü seçilmiş ve enerji güç dönüşüm denklemleri kullanılarak özel enerji tüketimi değerini (SEC (Specific Energy Consumption)) optimum yapan şartlar belirlenmiştir. Optimum şartların belirlenmesinde, Taguchi Yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen malzemelerin içyapıları ve sertlik değişimleri incelenmiştir. SEC sonuçları incelendiğinde %73,91 oranda işleme tipinin ve %26,05 oranda da devir sayısının etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre tezgah türü olarak CNC freze, devir sayısı olarak 180 RPM ve alaşım tipi olarak da %8 Pirinç Takviyeli 6061 Alüminyum alaşımı seçildiğinde optimum şartlar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Özel enerji tüketimi, alüminyum fittings, boru diş açma, Taguchi metodu.

## Specific Energy Consumption (SEC) Model for Types of Two Different Production of Fittings which is Reinforced by Chip of Copper and Brass

### ABSTRACT

TS 11 EN 10242 Pipe fittings (fittings) manufactured according to standards and geometries; It is widely used in many sectors such as aerospace, automotive and machinery production, mainly in building natural gas and water installations. Threading of the fittings to the materials at one time is usually carried out on CNC mill and on special manual threading machines. In addition, fittings are also thread by universal lathes. Especially in America and India, aluminum alloy fittings manufactured for the automotive industry and mechanical equipment are alloyed via chips of brass and copper in this study. Pipe fittings for the first time in the literature, considering industrial mass production conditions, made in gradual threading via lathes and milling by tap tool were evaluated comparatively. In this study, speed, alloy type, and machine type are selected as parameters and the conditions which make optimum specific energy consumption (SEC) by using energy power conversion equations are determined. Taguchi method was used to determine the optimum conditions. microstructure and hardness changes in the obtained materials were investigated. When the results of SEC were examined, it was observed that 73,91% of the processing type and 26,01 % of the rotational speed were effective. According to these results; CNC milling as the machine type, 180 RPM as the number of revolutions, and 8% brass reinforced 6061 aluminum alloy as the alloy type, conditions were obtained.

**Keywords:** Specific Energy Consumption (SEC), aluminum fittings, pipe threading, Taguchi method

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Seri üretimde maliyetlerin azaltılması ve sürdürülebilirliğin artırılması için enerji tüketiminde optimizasyon ile ilgili yapılan araştırmalar günümüzde önemli bir konu başlığını oluşturmaktadır [1-3]. Dünya çapında üretim için gerekli olan enerji ihtiyacının gün geçtikçe artması ve enerji üretiminin yeterli düzeyde

sağlanamaması günümüzde enerji ücretlerinde önemli bir artışa sebep olmuştur. Aynı zamanda üretimin ve enerji ihtiyacının yüksek oranda artış göstermesi sonucunda, çevre kirliliği de artış göstererek çeşitli iklim değişikliklerini ortaya çıkarmıştır [4,5]. Endüstride enerji tüketiminin yüksek oranda yapıldığı yerlerden biriside talaşlı imalat yapan kuruluşlardır. Sürdürülebilir üretim, birçok mühendislik alanına ve uygulamasına ait önemli unsurları içerisinde barındırmaktadır [6].

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : burak.ozturk@bilecik.edu.tr

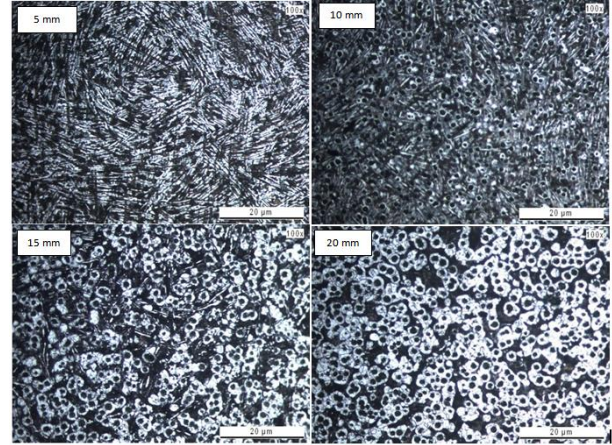
Sürdürülebilir üretim uygulamalarının geliştirilmesi kuruluşların ekonomik ve çevresel performanslarını artırmalarına imkân sağlamaktadır. Makine ekipmanlarının elektrik sarfiyatlarını azaltmak ve çevre dostu bir üretim gerçekleştirmek için tedbirlerin araştırılması üretim sektörü için büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle CNC makinelerde enerji tüketimi miktarlarının incelenmesi gerekmektedir [7].

Üretimle ilgili daha iyi bir enerji verimliliği elde etmek için takım tezgâhı ve kesme işlemi arasındaki elektrik enerjisi tüketimi ilişkisinin incelenmesi günümüzde zorunlu hale gelmiştir. Enerji sarfiyatı ülke ekonomileri için birçok seri üretim kuruluşunda önemli bir üretim parametresi olarak yer almaktadır. Yüksek miktarda enerji sarfiyatı yapılan ürünlerden biride boru bağlantı elemanlarıdır. Boru bağlantı elemanlarının üretim maliyetlerinin azaltılması için talaş kaldırma parametrelerinin endüstriyel koşullar altında incelenmesi bu araştırmanın temellerini oluşturmuştur. Literatürde farklı metal kesme parametrelerinin optimizasyonu ile ilgili çeşitli çalışmalar yayınlanmıştır [8-14]. Bu çalışmalarda, araştırmacılar yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti, kesme gücü, takım ömrü ve talaş kaldırma oranı gibi bazı talaşlı imalat parametreleri incelemiştir. Delik delme ve frezeleme işlemi için kesme koşullarının güç tüketimi üzerindeki etkisi ölçülmüştür [8]. CNC dik işleme tezgâhında kanal frezeleme işlemi sırasında kuvvetler ve güç tüketimi ölçülerek yeni bir talaşlı imalat enerji tüketimi modeli önerilmiştir [9]. Diğer bir çalışmada torna tezgâhlarında enerji sarfiyatı en aza indirilirken, en iyi yüzey kalitesini elde etmek için gerekli optimum kesme parametresi değerleri tespit edilmiştir [10]. 5 eksen CNC Freze tezgâhında optimize edilmiş takım eğim açısı belirlenmiş ve bunun sonucunda enerji tüketimi azalmıştır [11]. Tornalama sırasında kesme bölgelerinde ortaya çıkan ısının iş parçasının yüzey kalitesinde ve güç tüketiminde önemli bir rol oynadığı bir başka çalışmada gözlemlenmiştir [12]. Yüzey frezeleme ile talaş kaldırma işlemi sırasında tüketilen güç endeksindeki artışları ölçülerek iki farklı kaplama tipine sahip kesici takım ile talaşlı imalat işleminde optimizasyon sağlanmıştır [13]. Frezeleme işlemi sırasında yüzey pürüzlülüğünün tahmin edilmesi için spesifik kesme enerji tüketiminin (SCEC) analitik hesaplanmasını ve yüzey pürüzlülüğü ile SCEC arasındaki korelasyonun deneysel karakterizasyonunu birleştiren bir yaklaşım geliştirilmiştir [14].

## 2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLI BORU BAĞLANTI ELEMANLARI (ALUMINUM ALLOY FITTINGS)

TS 11 EN 10242 standartlarında üretimi yapılan dökme demir boru bağlantı elemanlarının seri üretimi için, ısıl işlem ve galvaniz kaplama gibi bazı imalat işlemleri gerekmektedir. Bu sektörde son 20 yılda 18 adet TSE, İSO ve Yerli Malı belgeli üretim yapan sanayi kuruluşu, Çin ve Tayvan gibi uzak doğu ülkelerinde üretilen ürünler ile pazar rekabet gücünü kaybederek üretimini

durdurmuştur [15]. Bunun en muhtemel nedeninin üretim maliyetleri olduğu düşünülmektedir. Özellikle bu ürünlerin cidar kalınlıkları çok ince olduğundan dolayı, döküm soğuma hızları çok yüksektir [16]. Soğuma hızı neticesinde ortaya çıkan izotermal dönüşüm ile son derece kırılğan mikroyapılar oluşmaktadır (Şekil 1.) [16].



Şekil 1. Fittings ürünlerin cidar kalınlığına bağlı olarak mikroyapı değişimleri (Microstructure changes depending on wall thickness of fittings)[16]

Fittings malzemelere uygulanan östemperleme ısıl işlemi ile kırılğanlık azalırken sertlik artmaktadır. Östemperleme ısıl işlemi ile işlenebilirlik olumsuz yönde etkilendiğinden endüstride sadece östenitleme ısıl işlemi uygulanarak malzemeler yumuşatılır. Bu işlem ise malzemenin akma dayanımını azaltmakta olup, sertlik değerlerini 90-100 HB değerlerine düşürmektedir. Böylelikle işlenebilirlik artarken emniyet katsayısı azalmaktadır [17]. Avrupa'da prinç ve Amerika'da bakır, fittings malzemesi üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca bu ürünler Hindistan ve Çin'de 6061-T6 malzemesinden üretimi yapılmaktadır.

Ülkemizde ise mukavemetsiz, işlenebilirliği düşük ve üretim maliyeti yüksek olan dökme demir fittings malzemeler yerine işlenebilirliği daha yüksek, üretim maliyeti daha az ve daha mukavemetli malzeme olarak alüminyum 6061 malzemesinin kullanılabilmesi düşünülmektedir. Üretim maliyetlerini artırmadan mukavemet özelliklerini iyileştirmek boru bağlantı elemanı üreticileri için önemli bir amaçtır. Alüminyum 6061 malzemesinin kullanımında, mukavemet özellikleri dökme demir fittings malzemeler ile karşılaştırıldığında daha düşüktür. Bu yüzden alüminyum alaşımlarının güçlendirilmesi gerekmekte olup, bu konuda literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bir çalışmada, Al-Mg-Si alaşımlarının doğal yaşlanma ve çökeltme sertleşme davranışına Ag ve Cu ilavesi ile elementlerin etkisi incelenmiştir [18].

Bir diğer çalışmada, süper yüksek mukavemetli Al-Li alaşımını geliştirmek için, T8 ısıl işlemlili Al-Cu-Li alaşımlarının mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir [19]. Farklı bir araştırmada, çeşitli yapay

yaşlandırma işlemleri sırasında Al-Si-Mg-Cu alaşımlarının mekanik ve termal özelliklerine intermetaliklerin çökmesinin etkisi araştırılmıştır [20]. Mevcut alaşımların mekanik özelliklerini arttırmak için farklı katılaşma koşullarında Al-Si-Mg alaşımının üçlü sisteminde bakır kullanılmıştır [21]. Kılıçarslan vd. Fe-Si içeren Al-Cu-Fe sistemine dayanan %10 Cu elementi içeren bir hipotektik alaşım araştırmışlardır. Mikroyapı dağılımı ve katılaşma yapısı, alaşımın tribolojik özelliklerinde artış ile sonuçlanmıştır [22].

Bu makalede, literatürde alüminyum alaşımlarının güçlendirilmesi ile ilgili araştırmalar dikkate alınarak, boru bağlantı elemanlarının sertlik değerlerini artırmak ve ikinci bir ısıl işlem yapmadan seri üretim için 6061 alaşımı güçlendirilmek istenmiştir. Araştırmamızda, endüstride kuru kesme tornalama işlemi sonucunda elde edilmiş pirinç ve bakır talaşları düşük maliyetleri nedeniyle, 6061 alaşımının güçlendirilmesinde kullanılmıştır. Böylece ince talaşların geri dönüşümü sonucunda sürdürülebilirlik düşük maliyet ile sağlanabilecek ve 6061 alaşımı güçlendirilerek sertlik değeri ve mekanik özellikleri iyileştirilebilecektir. Alüminyum 6061-T6 fittings malzemelerinin üretim maliyetlerinin azaltılması ve mukavemetinin artırılmasıyla kullanım isteğinin ülkemizde artabileceği düşünülmektedir. Bunun sonucunda üretilen malzemeler ile sıhhi tesisat ve doğalgaz sistemlerindeki güvenilirlik artabilecektir. Endüstride iç dış açma işlemi iki farklı tip tezgâhta gerçekleştirilmektedir. Bunlardan bir tanesi CNC freze ve kılavuz kullanılarak dış açma işlemidir. Diğer bir üretim işleminde ise kademeli dış açma işlemi torna tezgâhı kullanılarak uygulanmaktadır. Bu iki farklı tezgâh da, aynı talaşlı imalat işlemi için kullanılmasına rağmen, üretim süreleri ve enerji tüketimleri arasında farklılıklar mevcut olup, bu konuda bir araştırmaya literatürde rastlanılmamıştır. Çalışmamızda, her iki üretim yöntemi farklı tip alaşımlar için karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Parametre olarak devir sayısı, alaşım tipi ve tezgâh türü seçilmiş, özel enerji tüketimlerini optimum yapan şartlar Taguchi Metodu kullanılarak belirlenmiştir.

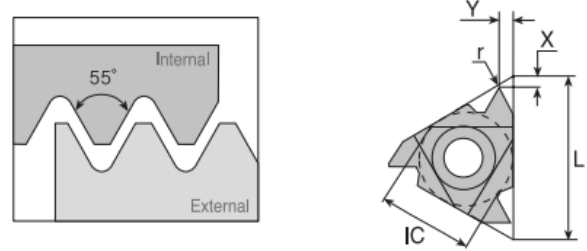
### 3. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

#### 3.1. Dış Açma İşlemi ve Taguchi L18 (21x32) Deneysel Tasarımı (Taguchi L18 (2<sup>1</sup> x 3<sup>2</sup>) Design of Experiment (DOE))

Boru bağlantı elemanlarının imalatı yapılan endüstriyel kuruluşlarda dış çekme işlemi, devir sayısı değişimleri ile ilişkilendirilir. Genel olarak endüstride devir sayısı 90-180 RPM aralıklarında alınarak dış açma işlemi gerçekleştirilmektedir.

Üniversal Torna, fittings seri üretimde kullanılan bir takım tezgâhtır. Bu tezgâhlarda dış açma işlemi kademeli olarak gerçekleştirilmektedir. Bu makalede torna tezgâhında dış açma işlemi sırasıyla dış dibi tornalama işlemi ve sonrasında ise sırası ile 0,65, 0,35 ve 0,15 mm paso miktarıyla gerçekleştirilmiştir. Her deney

iki kez tekrar edilmiştir. Talaşlı imalat işlemi sırasında Korloy 14W IR 55° iç dış açma takma ucu ve Korloy DCMT-HMP NC 5330 iç delik takma ucu kullanılmıştır (Şekil 2). Kademeli dış açma işlemi Toss SN 50 üniversal torna tezgâhında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Korloy 14W IR 55° sert metal uç (Korloy 14W IR 55° hard metal insert)

Diğer bir yöntem olan CNC Freze tezgâhında dış açma işlemi uygulanırken, Microcut 1000 CNC dik işleme tezgâhında 1/2 BSP dış çekmek için, Well Cut marka hava çeliği kılavuz kullanılarak dış açma işlemi gerçekleştirilmiştir. Redüksiyon ürünlere, tezgâh tablasına 4 ayaklı aynaya bağlanan iş kalıbı yardımı ile dış açma işlemi yapılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Kalıp bağlantısı (solda), Welcut 1/2" BSP kılavuz (Mold connection (left), Welcut 1/2" BSP tap tools)

Yapılan çalışmada, deney tasarımı ve analiz yöntemi olarak Taguchi  $L_{18}$  ( $2^1 \times 3^2$ ) faktöriyel fraksiyonel deney tasarımı kullanılmıştır. Parametrelerin etki oranlarını hesaplamak için Anova Varyans Analizi yapılmıştır. Taguchi  $L_{18}$  ( $2^1 \times 3^2$ ) faktöriyel fraksiyonel deney tasarımı Çizelge 1'de ve kullanılan parametreler ve seviyeleri ise Çizelge 2'de verilmiştir. Maliyetleri en düşük seviyede tutmak için en az deney yapma prensibine dayanan yöntemlerden birisi olan ve Japon Bilim adamı Genichi Taguchi'nin geliştirmiş olduğu bu yöntemin diğer istatistiksel deney tasarımı yöntemlerinden farkı; bir deneyi etkileyen parametreleri, kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen olmak üzere iki grupta incelemesi ve çok sayıda parametreyi ikiden fazla seviyede incelemeye imkân sağlamasıdır.

**Çizelge 1.** Taguchi  $L_{18}$  ( $2^1 \times 3^2$ ) Deney Tasarımı (Taguchi  $L_{18}$  Design of Experiment (DOE))

Deney No	Değişkenler																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Tezgah Türü (A)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Devir Sayısı (RPM) - (B)	1	1	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	3	3	3
Alaşım Tipi (C)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3

**Çizelge 2.** Diş Açma İşlemi Parametreleri (Parameters of Threading)

Tezgah Türü (A)	Devir (RPM) (B)	Alaşım Tipi (C)
CNC Freze	90	6061
Üniversal Torna	125	6061+ %8 Pirinç T.
-	180	6061+ %8 Bakır T.

Taguchi yaklaşımında, sonuçları analiz edebilmek için S/N oranı olarak bilinen bir istatistiksel performans ölçüsü kullanılır. Deneylerden elde edilen sonuçlar sinyal/gürültü oranına (S/N) çevrilerek değerlendirme yapılır. S/N oranındaki S sinyal faktörünü, N ise gürültü faktörünü ifade etmektedir. Sinyal faktörü sistemden alınan gerçek değeri, gürültü faktörü ise deney tasarımına katılamayan fakat deney sonucuna etki eden faktörleri ifade etmektedir. Gürültü kaynakları, elde edilmek istenen performans karakteristiklerinin hedef değerden sapmasına sebep olan tüm değişkenlerdir. SEC (Specific Energy Consumption) ve  $P_{Total}$  (kW) sonuçlarının düşük olması elektrik tüketimi açısından büyük bir öneme sahiptir. Aynı zamanda bu veriler bir ürünün işlenebilirliği hakkında bilgi vermektedir. Sonuçların en küçük değerde olması için deney tasarımı parametrelerinden sonuçları en küçük yapanlar belirlenmelidir. S/N oranlarının hesaplanmasında; karakteristik tipine bağlı en küçük en iyidir eşitliği (Eşitlik 1.) kullanılmıştır [13].

$$En\ küçük\ en\ iyi : \frac{S}{N} = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (1)$$

### 3.2. Deney Numunelerinin Dökümü (Casting Of Test Samples)

Bu çalışmada, et kalınlığı ince ve soğuma hızı en fazla olan malzemelerden biri olan  $\frac{3}{4}$  -  $\frac{1}{2}$  inç redüksiyon, deney numunesi olarak seçilmiştir. Bu ürünün tasarımı TS 11 EN 10242 standartlarına göre yapılmıştır. Çizelge 3'de redüksiyon fittings malzemesinin tasarım özellikleri yer almaktadır. Ayrıca Çizelge 4'de deneysel çalışmada kullanılmak üzere Seykoç Alüminyum kuruluşundan temin edilmiş 6061 alaşımının ve Çizelge 5'de pirinç talaşının Oxford Faundry Master Pro spektrometre ile ölçülmüş kimyasal analizleri verilmiştir.

**Çizelge 3.** Tasarım Özellikleri (Design Specifications)

Model Adı	Tasarım Hacmi (mL)	İç Diş Talaş Hacmi (mL)	İç Diş Talaş Oranı (%)	Adım (mm)	Diş Boyu (mm)	Diş Ölçüsü
3/4 - 1/2" Red.	10,097	0,302	3	1,814	20	1/2" BSP

**Çizelge 4.** Alüminyum Alaşımının Kimyasal Analizi (Chemical Analysis of Aluminum Alloy)

Element Adı	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
% Ağırlık Oranı	96,5	0,77	0,33	0,73	0,06	1,2	0,07	0,13

**Çizelge 5.** Pirinç Malzemenin Kimyasal Analizi (Chemical Analysis of Brass Material)

Element Adı	Cu	Zn	Pb	Sn	Fe	Ni	Sb
% Ağırlık	59,6	37,1	2,12	0,415	0,275	0,205	0,051

Boru bağlantı elemanlarının modelleri, kuma döküm derece sisteminde, mekanik pres yardımıyla kalıplanmıştır. Temiz grafit pota kullanılarak  $750^\circ\text{C}$  sıcaklıkta deney numuneleri eritilmiştir. Farklı numuneler homojen dağılım için sıvı fazda 30 dk sürede 300 RPM hızla karıştırılmıştır ve sonrasında kalıba dökülmüştür. Dökümü yapılan üç farklı alüminyum fittings malzemesi numaralandırılarak gruplandırılmıştır.

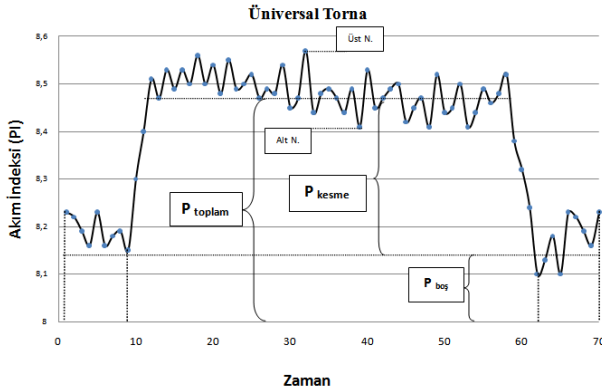
### 3.3. DENEY NUMUNELERİNİN İMALATI VE GÜÇ İNDEKSLERİNİN (A) ÖLÇÜMÜ (MANUFACTURE OF TEST SAMPLES AND MEASUREMENT OF POWER INDEXES (A))

Torna tezgahında akım değişimleri asenkron motora ve CNC frezede ise motor sürücüsünün üç fazlı girişinin her birine Dijital Entes epm 4c ampermetre ve Entes ct-25 akım trafosu bağlanarak, 0,07-200 A aralığında  $\pm 1$  A hassasiyeti ile güç indeksi ölçümü yapılmıştır (Şekil 1). Şekil 3'de torna ve şekil 4'de CNC freze için ölçülen akım değişim grafiği yer almaktadır. Motorlar iki nedenden dolayı güç harcarlar. Mil şaftını hızlandırmak / yavaşlatmak ve ataletine, sürtünme direncine ve yer çekimine karşı hareket ettirmek ilk nedendir ( $P_{boş}$ ).

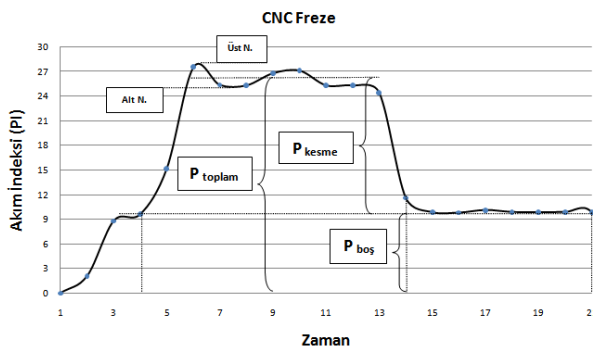
Kesme direncinin üstesinden gelmek için gerekli kesme kuvvetini sağlamak ise ikinci sebeptir ( $P_{kesme}$ ) [8]. Eşitlik 2 normal çalışma sırasında bir takım tezgâhının güç tüketiminin P (Wh) modelini göstermektedir.

$$P = P1 x (T1 + T2) + P2 x T2 + P3 x T3 \quad (2)$$

Burada, P toplam enerji tüketimi ( $P_{toplam}$ ), P1 çalışma durumu ne olursa olsun makine çalışması sırasında sabit güç tüketimi ( $P_{boş}$ ), T1 (h) tezgâhın talaş kaldırmadığı yani boşta hareket ettiği süre, T2 (h) talaş kaldırma sırasındaki süre, P2 kesme koşullarında mil ve servo motor tarafından güç tüketimi ( $P_{kesme}$ ), P3 işi konumlandırmak ve iş milini belirtilen hıza kadar hızlandırmak/yavaşlatmak için güç tüketimi ve T3 (h) gereken zamandır ( $P_{boş}$ ). Şekil 4 ve 5’de bu farklı güç tüketim bölgeleri her iki tezgâh için detaylı bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4. Torna tezgâhında dış açma işlemi sırasında oluşan akım değişimleri



Şekil 5. CNC Freze tezgâhında dış açma işlemi sırasında oluşan akım değişimleri

Talaş kaldırma işleminde ampermetre ile spindle servo motor sürücüsünün çektiği güç indisi (A) ölçülmekte, 3 fazlı motor enerji güç dönüşüm denklemi (Eşitlik 3) ile kW türünden güç tüketimine dönüştürülmektedir [12]. Güç faktörü değeri literatürden alınmıştır . Bu eşitlikte; V=Spindle Motoru Voltaj Değeri (V, 0,38),

I=Ampermetre ile ölçülen enerji yükü (A), Cos  $\sigma$ =Güç Faktörü (Servo; 0,60, Asenkron Motor; 0,85)’dür.

$$P_{toplam} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \sigma \quad (3)$$

Talaşlı imalat işlemleri ile ilgili yapılan araştırmalar günümüzde önemli konu başlıklarını oluşturmaktadır [23-25]. Yapılan literatür araştırmaları sonucunda, enerji güç dönüşüm denklemleri ile MRR (Material Removal Rate), SCEC (Specific Cutting Energy Consumption) ve SEC (Specific Energy Consumption) gibi talaşlı imalat işlemlerinde önemli kesme parametrelerinin hesabı yapılabilmektedir. MRR; İş parçasından bir saniyede kaldırılan  $mm^3$  cinsinden talaş miktarıdır. MRR aşağıda verilen Eşitlik 4 ile hesaplanmaktadır. Ap derinlik miktarı, ae talaş kaldırılan genişlik yada yana kayma miktarı ve F ilerleme hızıdır SEC ise eşitlik 5’de yer alan formülle hesaplanan  $1 mm^3$  talaş kaldırmak için toplam enerji tüketimi miktarıdır [9,13].

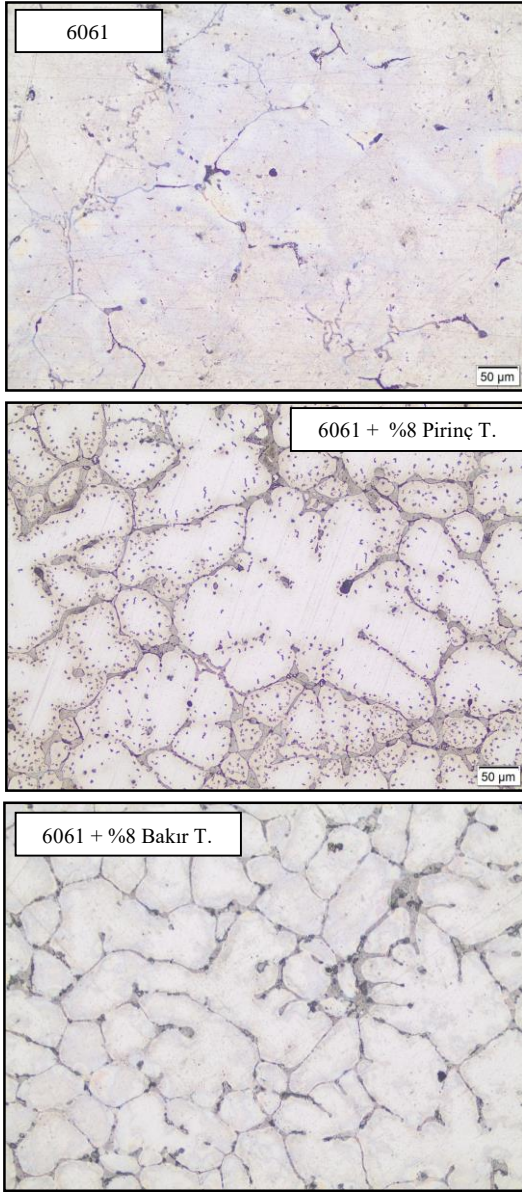
$$MRR = (ap * ae * F) / 1000 \quad (4)$$

$$SEC \left( \frac{J}{mm^3} \right) = \frac{P_{total} (W)}{MRR \left( \frac{mm^3}{s} \right)} \quad (5)$$

#### 4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME (RESULTS AND DISCUSSION)

##### 4.1 Mikroyapı Sonuçları (Microstruc. Results)

Deney numunelerinin mikroyapı görüntülerini elde etmek için dış yüzeylerinde ilk olarak finish tormalama işlemi yapılmıştır. Daha sonra metalografik parlatma ve dağlama (etching) işlemleri ile mikroyapının ortaya çıkması sağlanmış ve optik mikroskop görüntüleri alınmıştır (Şekil 6). 6061 Alüminyum alaşımı numunesinin mikro yapısındaki  $\alpha$ -Al fazına ait tane boyutları  $50 \mu m$  ile  $250 \mu m$  arasında değişmekte olup, ortalama tane boyutu  $150 \mu m$  dir. Tane sınırlarında kısmen köşeli hatlar gözükse de, genelde tane sınırları keskin kenarlara sahip değildir ve tanelerin en-boy oranları bir birilerine yakındır (plaka türü tane yapısı). Bu mikroyapı sertlik değeri 27 HB’dir. Prinç talaşı katkılı numunede ise tane sınırları biraz daha küçüktür. Ayrıca çinkonun tane sınırlar içinde noktalar halinde benek şeklinde dağılım gösterdiği düşünülmektedir. Bu mikroyapı sertlik miktarı 76 HB’dir. Bakır talaşı katkılı numuneye bakıldığında ise  $\alpha$ -Al fazlarının boyutlarının diğer her iki numuneden de daha küçük olduğu (ortalama  $70 \mu m$ ) ve yapı içerisinde daha homojen bir şekilde dağıldıkları görülmektedir Bu malzemeye yapılan bakır ilavesiyle tane yapısındaki bu küçülme nedeniyle yine sertliğin 97 HB’le arttığını düşünüyoruz. Ayrıca literatürde de  $\alpha$ -Al fazının tane boyutlarının küçülmesi sertlik değerlerinin artmasına neden olduğu rapor edilmektedir [18-22].



Şekil 6. Alüminyum Boru Bağlantı Elemanının Mikroyapı Resimleri (Microstructure of Aluminum Fittings)

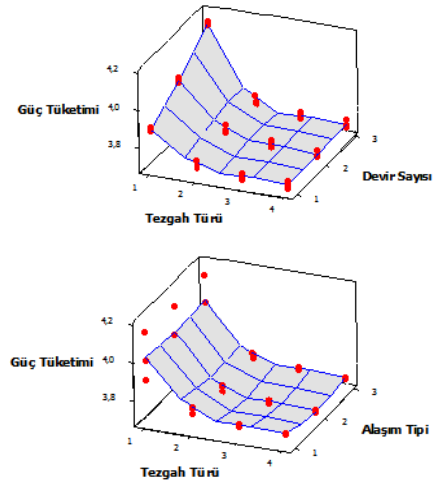
#### 4.2 ENERJİ TÜKETİMİ SONUÇLARI (ENERGY CONSUMPTION RESULTS)

Üniversal torna tezgahında diş açma işlemi kademeli olarak gerçekleştirilmiştir. Böylece farklı paso miktarlarında tüketilen enerji tüketimi incelenebilecektir. Bu yüzden Taguchi analizi dışında sonuçlarında elde edilmesi gereklidir. Bu sebeple belirlenen deney tasarımına göre akım değişimleri, torna tezgahında diş açılırken ölçülmüştür (Çizelge 6). Enerji güç dönüşüm eşitlikleri kullanılarak kWh olarak güç tüketimleri hesaplanmıştır. En yüksek güç tüketimi 180 RPM’de ve takviyesiz 6061 alaşımı için tornalama işleminde gözlemlenmiştir. En az güç gereksinimi ise 90 RPM’de ve prineç talaşı takviyeli alaşımda, 0,15 mm diş derinliğinde diş açma işlemi yapılırken gözlemlenmiştir.

Çizelge 6. Torna Tezgahında Kademeli Diş Açma İşleminde Enerji Tüketimi Sonuçları (Energy Consumption Results of Gradual Threading on Lathe)

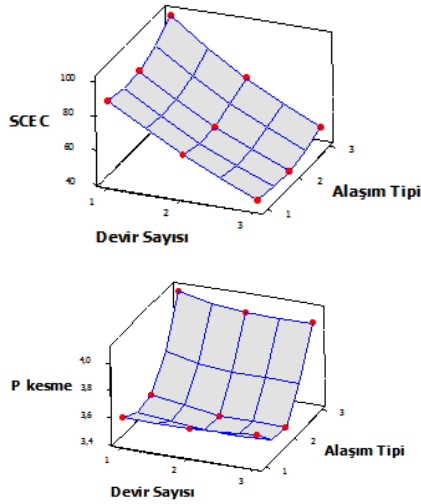
Deney No	Tornalama	Diş derinliği (mm)			Güç (P)	SEC (J/mm <sup>3</sup> )
		0,65	0,35	0,15		
1	3,90	3,76	3,74	3,73	3,78	366,83
2	3,88	3,72	3,70	3,69	3,75	363,41
3	3,89	3,74	3,72	3,71	3,76	364,86
4	4,01	3,80	3,75	3,74	3,82	267,00
5	3,98	3,75	3,71	3,70	3,79	264,52
6	3,99	3,77	3,73	3,71	3,80	265,57
7	4,15	3,79	3,74	3,74	3,86	187,08
8	4,13	3,75	3,71	3,70	3,82	185,35
9	4,14	3,76	3,72	3,72	3,84	186,09

Torna tezgahında işleme tipi değişimlerinin devir sayısı ve alaşım tipi ile farklı formasyonlarının güç tüketimine etkilerinin gözlenmesi için Minitap paket programında surface plot grafiği oluşturulmuştur (Şekil 7). Devir sayısı artıca ve işleme tipi değişimine göre, güç tüketimi artış göstermiştir. Tornalama işleminde devir sayısı değişimi daha yüksek oranda güç tüketimi sonuçlarına etki etmiştir. Malzeme tipinin etkisi torna ile kademeli diş açma işleminde işleme tipine göre çok daha az olduğu söylenebilir.



Şekil 7. İşleme Tipi-Devir Sayısı (solda) ve İşlem Tipi- Malzeme Tipi (sağda) Değişimlerinin Güç Tüketimine Etkileri (Effect of Type of Process – Rev. (left) and Type of Process - Material Type (right) Changes on Power Consumption)

CNC dik işleme tezgahından elde edilen SCEC ve  $P_{kesme}$  değerleri malzemelerin işlenebilirliği hakkında bilgi vermektedir [13]. Bu üç farklı tip alaşımın, farklı devir sayılarındaki kılavuz ile diş açma işlemi enerji tüketimlerine etkileri, grafik haline getirilmiştir (Şekil 8). Devir sayısı azaldıkça SCEC değeri uzaklaştırılan talaş miktarı ile orantılı olarak artmaktadır. İşlenebilirliği en yüksek olan malzeme prineç talaşı takviyeli 6061 alaşımıdır.  $P_{kesme}$  değeri incelendiğinde işlenebilirliği diğerlerinden daha düşük olan bakır talaşı takviyeli malzemelerdir.



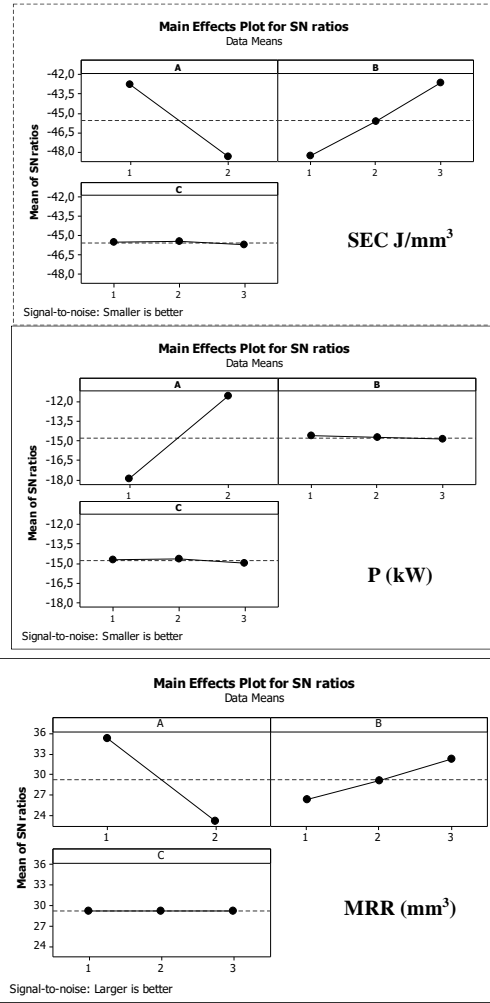
Şekil 8. CNC Dik İşleme Tezgâhı S/NC ve  $P_{kesme}$  Değişimleri Grafiği (Graph of S/NC and  $P_{cutting}$  Change on CNC Mill)

Çizelge 1’de yer alan deney tasarımı parametrelerine ve seviyelerine bağlı olarak dış açma işlemi uygulanmıştır. Montajı gerçekleştirilen akım trafosu ve ampermetre deney düzeneği yardımıyla anlık akım değişimleri (PI (A)) ölçülmüştür. Enerji - güç değişim denklemleri (Eşitlik 2-5) kullanılarak yapılan bu hesaplamalar sonucunda elde edilen enerji tüketimi sonuçları Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 7. Enerji Tüketimi Sonuçları (Energy Consumption Results)

Deney No	SEC (J/mm <sup>3</sup> )	P (kW)	MRR (mm <sup>3</sup> )
1	184,03	7,56	41,08
2	183,06	7,52	41,08
3	196,45	8,07	41,08
4	136,65	7,8	57,08
5	134,55	7,68	57,08
6	144,18	8,23	57,08
7	97,37	7,99	82,06
8	95,54	7,84	82,06
9	102,24	8,39	82,06
10	366,83	3,78	10,31
11	363,41	3,75	10,31
12	364,86	3,76	10,31
13	267	3,82	14,31
14	264,52	3,79	14,31
15	265,57	3,8	14,31
16	187,08	3,86	20,61
17	185,35	3,82	20,61
18	186,09	3,84	20,61

Verilerin Anova Varyans analizi yapılarak, sonuçlar Şekil 9’da S/N grafiği olarak verilmiştir. Bu grafik yardımı ile belirlenen kriterlere göre tasarım parametrelerinin optimum seviyeleri seçilecektir.



Şekil 9. Taguchi Analizi S/N Grafikleri (Taguchi Analysis S/N Graphics)

Şekil 9’da SEC için S/N değerleri dikkate alındığında, sırası ile A1,B3,C2 seviyelerinin optimum sonuçları sağladığı gözlemlenmiştir. Buna göre CNC Freze tezgahında dış açma işlemi, 180 RPM’de pirinç talaşı katkılı alaşıma uygulanması ile optimum değer elde edilebileceği anlamına gelmektedir. Alaşım tipi değişimleri tüm sonuçları diğer parametrelere göre çok fazla oranda etkilememektedir. Anlık güç tüketiminde en önemli parametre tezgah türüdür. CNC freze tezgahı daha fazla anlık enerji sarfiyatı yapmaktadır. Devir sayısı artırılarak ve CNC freze tezgahı kullanılarak MRR sonuçları için en iyi değerler elde edilebilmektedir. Anova Varyans analizi kullanılarak her bir tasarım parametresinin sonuçları etki şiddetleri hesaplanmaktadır. Minitap Programında Varyans Analizi deney tasarımına ve sonuçlarına uygulandığında Çizelge 8’deki sonuçlar elde edilmiştir. SEC sonuçları incelendiğinde malzeme tipi çok düşük etki şiddetinde sonuçlara etki etmektedir. Anlık güç tüketimi sonuçlarına ise en fazla tezgah tipi etki ederken malzeme türü devir sayısından daha fazla etkili olmuştur.

**Çizelge 8** Anova Analizi Sonuçları (Anova Analysis Results)

	Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% Etki
SEC (J/mm <sup>3</sup> )	A	1	76916	76916	76916	150,66	73,91
	B	2	54210	54210	27105	53,09	26,05
	C	2	92	92	46	0,09	0,040
	Error	12	6126	6126	511		
	Total	17	137344				
P (kWh)	A	1	75,481	75,481	75,481	2843,47	99,74
	B	2	0,141	0,141	0,070	2,65	0,093
	C	2	0,259	0,259	0,130	4,88	0,167
	Error	12	0,319	0,319	0,027		
	Total	17	76,200				

### 5. TARTIŞMA (CONCLUSION)

Enerji üretim maliyetlerinin gün geçtikçe artması ve enerji kaynaklarının yetersiz kalması nedeniyle son yıllarda talaş kaldırma işlemleri enerji sarfiyatı üzerine yapılan araştırmaların sayısı artmıştır. Farklı alüminyum alaşımlı redüksiyon fittings ürünlerinin seri üretim koşulları dikkate alınarak iç diş açma işlemi iki farklı yöntem için bu makalede incelenmiştir. Metal kesme işlemlerinde enerji tüketimi araştırmaları ve farklı tip alüminyum alaşımlarının işlenebilirliği için bu makale ile referans bir kaynak oluşturulmuştur. Farklı tip alüminyum alaşımlar prınç ve bakır talaşı ilavesi ile elde edilerek üretim maliyetleri azaltılmak istenmiştir. Sertlik değeri 27 HB'den 76 ve 97 HB çıkartılmıştır. Bu sertlik artışı tane sınırlarının küçülmesi ile elde edilmiştir. Östenitleme ısıl işlemi ile 90-100 HB sertlik değerleri ortaya çıkan dökme demir fittings ürünler yerine bu çalışmada aynı sertlik değerlerine sahip alüminyum boru bağlantı elemanları üretilmiştir [16,17,26].

Nas ve Öztürk, küresel sfero malzemenin frezelemesi sırasında 3.2 kW enerji tüketimi ölçtüler [13]. Negrete 6061 alüminyum malzemesinin tornalanmasında maksimum 5,8 kW enerji tüketimi ortaya çıkmıştır [10]. Dökme demir fittings malzemelerin diş açma işlemi için 16,5 kWh toplam güç tüketimine ihtiyaç olduğu gözlemlenmiştir [17]. Bu çalışmada ise CNC freze tezgâhı için diş açma işlemi 7,52–8,39 kWh güç ile gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte diğer bir tezgah türü olan universal torna tezgâhında ise, 3,75–3,86 kWh güç ile kademeli diş açma işlemi gerçekleştirilmiştir. CNC freze tezgâhında 25,02 Wh ürün başına tüketim ile üretim yapılırken bu değerler torna tezgâhında 30,9 Wh'dir. Dökme demir malzemelere göre alüminyum alaşımların diş açma işleminde güç ihtiyacı daha azdır. Bu sonuçlar incelendiğinde özel enerji tüketimi (SEC) üzerinde tezgah türünün %73,91, devir sayısının %26,05 olduğu görülmektedir. Anlık güç (P) miktarı değişimi üzerinde ise %99,74 tezgah türü etkindir. CNC freze tezgâhında anlık tüketim çok daha fazla olmasına rağmen

tek operasyonda diş açma işleminde MRR daha yüksek olduğundan dolayı ürün başına maliyet daha azdır.

### 6. TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGE)

Katkılarından dolayı Konak Fittings Döküm Sanayi (Konak Rakor) çalışanlarına minnettarız. 2018-02.BŞEÜ.03-07 numaralı projeye vermiş oldukları destekten dolayı Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederiz.

### 7. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Weinert K., Inasaki I., Sutherland J.W., "Wakabayashi T., Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication", *CIRP Annals*, 53 (2): 511–537, (2004).
- Düzdar I., Kantoğlu B., Öztürk B., "A New Product Design After Benchmarking Analysis Of Helix Gear Pumps and Optimization in Energy Consumption", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6: 610-617, (2017).
- Ingarao G., Lorenzo D.R., Micari F., "Sustainability issues in sheet metal forming processes. an overview", *J. Clean. Prod.*, 19 (4): 337-347, (2011).
- Bhushan R.K., "Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites", *J. Clean. Prod.*, 39: 242-254, (2013).
- Balogun V.A., Mativenga P.T., "Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes", *J. Clean. Prod.*, 41: 179-186, (2013).
- Dufloy J.R., Kellens K., Dewulf W., "Unit process impact assessment for discrete part manufacturing: a state of the art", *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 4: 129-135, (2011).
- Hanafi I., Khamlichi A., Cabrera F.M., Almansa E., Jabbouri A., "Optimization of cutting conditions for sustainable machining of PEEK-CF30 using TiN tools", *J. Clean. Prod.*, 33: 1-9. (2012).
- Mori M., Fujishima M., Inamasu Y., Oda Y., "A study on energy efficiency improvement for machine tools" *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 60: 145–148, (2011).
- Liu N., Zhang Y.F., Lu W.F., "A hybrid approach to energy consumption modelling based on cutting power: a milling case", *Journal of Cleaner Production*, 104: 264-272, (2015).
- Negrete C.C., "Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA", *Journal of Cleaner Production*, 53: 195-203, (2013).
- Oda, Y. , Mori, M., Ogawa, K., Nishida, S., Fujishima, M., Kawamura T., "A study of optimal cutting condition for energy efficiency improvement in ball end milling with tool-workpiece inclination", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61: 119–122, (2012).
- Shokoohi Y., Khosrojerdi E., Shiadhi R., "Machining and ecological effects of a new developed cutting fluid in combination with different cooling techniques on turning operation", *Journal of Cleaner Production*, 94: 330-339, (2015).



- [13] Nas E., Öztürk B., "Optimization of surface roughness via the Taguchi method and investigation of energy consumption when milling spheroidal graphite cast iron materials", *Materials Testing For Production Technologies*, 60 (5): 519-524, (2018).
- [14] Liu N., Wang S.B., Zhang Y.F., Lu W.F., "A novel approach to predicting surface roughness based on specific cutting energy consumption when slot milling Al-7075", *International Journal of Mechanical Sciences*, 118: 13–20, (2016).
- [15] Öztürk B., Küçük Ö., Düzdar İ., Altınbilek Y.S., "Exploring the economical reasons of the usage of unhealthy & low resisting far-east products in the water pipe systems", *The Turkish Journal Of Occupational / Environmental Medicine and Safety*, 2 (3): 60-72, (2017).
- [16] Öztürk B., Öktem H., Said G., Çetindağ H. A., Erzincanlı, F., "Investigation of Cooling Rate on Hardness and Microstructure in Casting Fittings Materials", *Published in 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, 1278-1285, (2016).
- [17] Öktem H., Öztürk B., Akıncioğlu S., "Investigation of energy consumption on thread machining of austempered ductile cast iron materials", *5th International Conference and Exhibition on Mechanical & Aerospace Engineering*, 75, (2017).
- [18] Weng Y., Jia Z., Ding L., Pan Y., Liu Y., Liu Q., "Effect of Ag and Cu additions on natural aging and precipitation hardening behavior in Al-Mg-Si alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, 695: 2444-2452, (2017).
- [19] Li J.F., Liu P.L., Chen Y.L., Zhang H., Zheng Z.Q., "Microstructure and mechanical properties of Mg, Ag and Zn multi-microalloyed Al-(3.2-3.8) Cu-(1.0-1.4)Li alloys", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 25: 2103-2112, (2015)
- [20] Choia S.W., Chob H.S., Kumaic S., "Titanium as an intermetallic phase stabilizer and its effect on the mechanical and thermal properties of Al-Si-Mg-Cu-Ti alloy", *Materials Science & Engineering A*, 678: 267–272, (2016).
- [21] Shabestari S.G., Moemeni H., "Effect of copper and solidification conditions on the microstructure and mechanical properties of Al–Si–Mg alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, 193–199, (2004).
- [22] Kiliçaslan M.F., Yılmaz F., Ergen S., Hong S. J., "Uzun, O., Microstructure and microhardness of melt-spun Al–25Si–5Fe–XCo (X = 0, 1, 3, 5) alloys", *Materials Characterization*, 77: 15-22, (2013).
- [23] Özkan M.T., "Experimental and artificial neural network study of heat formation values of drilling&boring operations on Al 7075 T6 workpiece". *Indian Journal of Engineering & Materials Science*, 20: 259-268, (2013).
- [24] Akyürek F., Yaman K., Tekiner Z., "An Experimental Work on Tool Wear Affected by Die Clearance and Punch Hardness". *Arabian Journal for Science and Engineering*, (2017).
- [25] Chifor V., Tekiner Z., Türker M., Orban R., "An Experimental Investigation of Properties of polyethylene Reinforced with Al Powders". *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics Engineering)*, 1-5, (2010).
- [26] Özkan K., Burak Ö., İrem D., Samed V., Hüseyin Alp Ç., "Seri Üretim Boru Bağlantı Elemanlarının Döküm İşleminde Optimizasyon", *Politeknik Dergisi*, 20(3): 537-542, (2017).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Östemperleme işleminin CBN kesici takım gerilmeleri üzerindeki etkisinin nümerik simülasyonu

*Numeric simulation of effect on the CBN cutting tool stresses of austempering process*

Yazar(lar) (Author(s)): Kadir GÖK<sup>1</sup>, Arif GÖK<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-5736-1884

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-3309-6921

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Gök K. ve Gök A., “Östemperleme işleminin CBN kesici takım gerilmeleri üzerindeki etkisinin nümerik simülasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 37-44, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.452739

# Östemperleme İşleminin CBN Kesici Takım Gerilmeleri Üzerindeki Etkisinin Nümerik Simülasyonu

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Kadir GÖK<sup>1\*</sup>, Arif GÖK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Amasya Üniversitesi, Turkey

(Geliş/Received : 10.08.2018 ; Kabul/Accepted : 15.02.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, östemperleme işleminin kesici takım gerilmeleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen kesme kuvvetleri (esas kesme kuvveti, ilerleme kesme kuvveti ve pasif kuvvet) ANSYS Workbench programında, kesici takımdaki, talaş yüzeyi, esas kesici kenar ve yardımcı kesici kenar üzerine 3 boyutlu olarak uygulanmıştır. Östemperleme sürecinin rolünü vurgulamak için, ilk olarak Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) numuneler 900°C de 60 dakika tuz banyosunda östenitlenmiş, daha sonra 60 dakika boyunca 250°C ve 325°C deki bir tuz banyosunda ısıl işlem yapılmıştır. Analizler sonunda, kesici takım üzerindeki eş değer gerilme (vonMises), kayma gerilmesi (Tresca), X, Y ve Z yönlerindeki normal gerilmeler hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Metal kesme, sonlu elemanlar metodu, östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir.

## Numeric Simulation of Effect on The CBN Cutting Tool Stresses of Austempering Process

### ABSTRACT

In this study, we were investigated the effect of austempering process on the cutting tool stresses. The cutting forces obtained from experimental studies (main cutting force, feed force and passive force) were applied to rake face, main cutting edge, auxiliary cutting edge on the cutting tool as three dimensional in the ANSYS Workbench program. To emphasize the role of the austempering process, Ductile Iron (DI) specimens were firstly austenitized in salt bath at 900°C for 60 min, after which they were quenched in a salt bath at 250°C and 325°C for 60 min. The equivalent stress (von-Mises), shear stress (Tresca), normal stresses in the X, Y and Z directions on the cutting tool were calculated at the end of the analysis.

**Keyword:** Metal cutting, finite element method, austempered ductile iron.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metal kesme işlemleri deneysel, analitik ve sonlu elemanlar yöntemi ile yapılabilmektedir. Deneysel yöntemler hem maliyet hemde zaman açısından sınırlı bir yapıya sahiptir. Kesme analizleri talaşlı imalatta uygun kesme koşullarının araştırılmasında bir alternatif olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile kesme parametrelerine göre kesici takım, işparçası ve talaş üzerinde oluşan sıcaklık, kesme kuvveti, takım aşınması, kesici takım üzerinde oluşan normal ve kayma gerilmeleri, temas basıncı ve talaş oluşumu gibi durumular sayısal ve grafiksel olarak hesaplanabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile özellikle deneysel verilerin önceden tespit edilmesinde büyük kolaylık sağlamaktadır. Sonlu elemanlar yönteminin avantajlarının yanı sıra kullanımını kısıtlayan durumlarda söz konusudur. Metal kesme işlemi yüksek sıcaklık ve yüksek şekil değiştirme hızlarında gerçekleştiği için kesme sırasında kullanılan malzemenin mekanik özelliklerinin eksiksiz olarak bilinmesi gerekir.

Malzemelerin akma gerilmesi eğrileri (flow stress curves) özellikle kesme analizlerinde mutlaka kullanılmalıdır. Fakat günümüzde her malzemenin akma gerilmesi eğrisi mevcut değildir. Bunun için malzemenin farklı sıcaklıklarda ve şekil değiştirme hızlarında bir seri çekme testi yapılması gerekmektedir.

Birçok araştırmacı metal kesme sürecini sonlu elemanlar metodu kullanarak incelemiştir. Attanasio ve diğ. [1] takım aşınmasının 3 boyutlu olarak sonlu eleman analizini, Kose ve diğ. [2] ilerlemenin kesici takım gerilmeleri üzerindeki etkisini, Kim ve diğ. [3] kesici takım kenar yarıçapının sıcaklık ve kesme kuvvetleri üzerinde etkisini, Duran ve Nalbant [4] kesici takım üzerinde oluşan çökme değerlerinin sonlu elemanlar metodu ve kastiglano metodu ile karşılaştırılmasını, Jaharah ve diğ. [5] sonlu elemanlar metoduyla AISI 1045 çeliğin tormalanmasında çeşitli talaş ve boşluk açılarında sahip kesici takımların efektif gerilme ve sıcaklık artışına etkisini, Dechjarern [6] talaş açısının kesme performansı üzerinde etkisini, Uzun ve Aslantaş [7] kesme kuvvetleri, sıcaklık, kayma açısı ve takım gerilmesi üzerinde kaplama katman sayısı ve kaplama tipinin etkisini anlamak için bir seri deneysel ve sayısal çalışmayı, Zhou

\*Sorumlu Yazar (Corresponding author)  
e-posta : kadir.gok@cbu.edu.tr

ve diğerleri [8] süper finiş sert tornalamada, PCBN kesici takımın takım aşınması üzerinde pah açısının etkisini, Attanasio ve diğ. [9] visko-plastik parça tahmini kullanarak mikro fezelemenin sonlu eleman simülasyonlarını geliştirmiş ve DEFORM-3D yazılımında termo-mekanik bir analizini, Özel ve diğ. [10] deneysel doğrulama ile modelleme çalışmasını kullanarak, talaş akışı, talaş sıvanması ve çapak oluşumu için çok ihtiyaç duyulan süreç bilgisini, Özel [11] sabit ve değişken kayma ve sürtünme katsayılarına dayalı modeller geliştirerek, FE simülasyonları üzerinde takım-talaş arayüzeyi sürtünme modelinin etkilerini incelemişlerdir.

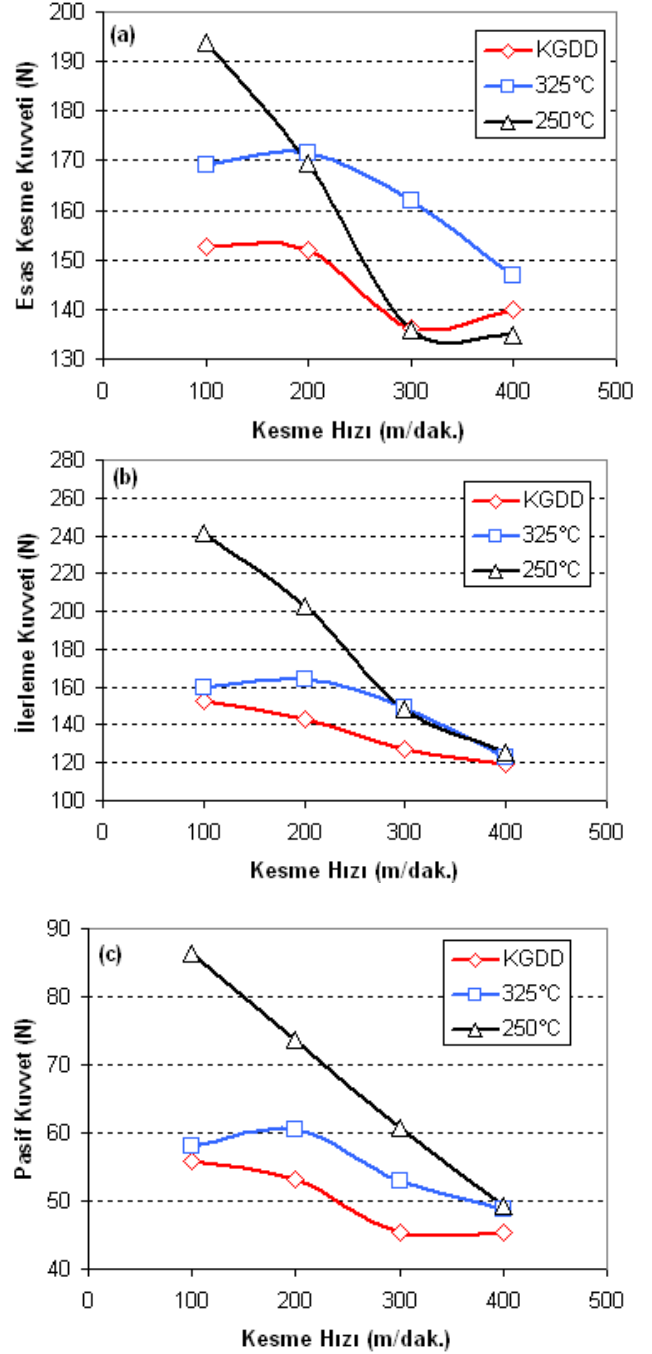
Küresel grafitli dökme demirler (KGDD) dişli, kam ve krank mili gibi pek çok makine ve otomotiv parçalarının üretilmesinde geniş kullanım alanına sahip malzemelerdir. KGDD malzemelerin son şeklinin verilmesinde, genellikle talaşlı imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Bu nedenle, KGDD malzemelerin işlenmesinde maksimum takım ömrü ve minimum üretim maliyeti için optimum kesme parametrelerinin ve uygun kesici takımın önceden belirlenmesi gerekmektedir [12, 13]

Bu çalışmada, KGDD ve farklı sıcaklıklarda östemperlenmiş KGDD malzemelerin işlenebilirlik testlerinden elde edilen kesme kuvveti değerlerinin, 3 boyutlu olarak modellenmiş kesici takımın, talaş yüzeyi, esas kesici kenar ve yardımcı kesici kenarı üzerine ANSYS Workbench paket programında uygulanması ile östemplenme işleminin kesici takım gerilmeleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

## 2. DENEYSEL VE SAYISAL İŞLEMLER (EXPERIMENTAL AND NUMERIC PROCESSES)

### 2.1. Metal Kesme İşlemi (Metal Cutting Process)

İşlenebilirlik testleri için Iscar tarafından üretilen CNMA 120404T IB55 kodlu CBN kesici takımlar kullanılmıştır. Takım tutucu olarak ise PCLNR 2525M 12 kodlu tutucu seçilmiştir. Kesici takıma ait uç yarıçapı 0.4 mm'dir. Takıma ait talaş ve boşluk açıları 0°'dir. Tornalama testi, sabit ilerleme, kesme derinliği ve 100, 200, 300 ve 400 m/dk arasında değişen kesme hızlarında yapılmıştır. Tüm işlenebilirlik testlerinde ilerleme  $f=0.05$  mm/dev, kesme derinliği  $a_p=1$  mm olarak alınmıştır. Soğutma sıvısı kullanılmamış ve tüm testler kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Tornalama sırasında kesici takım üzerinde kuvvetler meydana gelmektedir. Bu kuvvetler tornalama sırasında üç boyutlu ölçme yapabilen Kistler dinamometresi ile ölçülmüştür. Analizlerde kullanılan kesme kuvveti değerleri bu çalışmadan [14] alınmıştır (Şekil 1).



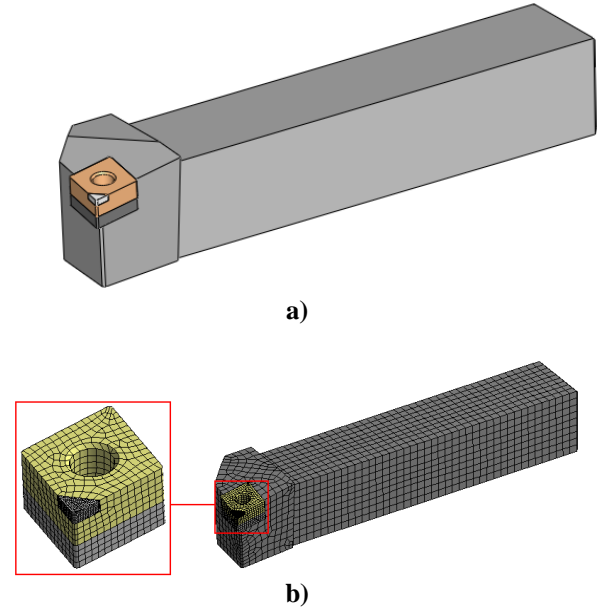
Şekil 1. Kesme kuvveti değerleri, (a) esas kesme kuvveti, (b) ilerleme kuvveti, (c) pasif kuvvet [14]. (Cutting force values, (a) main cutting force, (b) feed force, (c) passive force)

### 2.2. Sonlu Elemanlar Metodu Kullanarak Modelleme (Modelling Using Finite Element Method)

Kesici takım üzerinde meydana gelen gerilmeler, işlenebilirlik testlerinden elde edilen esas kesme kuvveti, ilerleme kesme kuvveti ve pasif kuvvet [14] değerleri kullanılarak ANSYS Workbench paket programında analiz edilerek elde edilmiştir. Takım tutucu, altlık, HSS uç ve CBN uca ait modeller SolidWorks 2010 versiyonunda oluşturularak (Şekil 2) "iges" formatında AnsysWorkbench sonlu eleman esaslı analiz

programında açılmıştır. Kesici takım üzerindeki tüm parçalar için Hex Dominant ağ (mesh) tipi seçilirken, farklı eleman boyutları kullanılmıştır. Eleman boyutları sırasıyla, takım tutucu için 3mm, altlık için 1mm, HSS uç için 1mm ve CBN uç için ise 0.25mm olarak seçilmiştir. Kesici takım ve diğer elemanların ağ yapısı Şekil 2 b' de verilmiştir. Ağ işlemi sonrası toplam 42410 düğüm, 11281 eleman meydana gelmiştir. Ansys, Inc tarafından geliştirilen Mesh Metric'e göre [15], sonuçların güvenilirliği açısından ağ kalitesi çok önemlidir. Düşük Ortogonal Kalite (Orthogonal Quality) veya yüksek çarpıklık (skewness) değerleri önerilmez. Genellikle minimum ortogonal kalite > 0.1 veya maksimum çarpıklık < 0.95 olmalıdır. Çarpıklık ağ metrikleri spektrumu ve Ortogonal Kalite ağ metrik spektrumu Şekil 3 ve Şekil 4' de verilmiştir. Analiz sonuçlarımızda, ortalama çarpıklık değeri Şekil 5' de 0.42 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3'e göre, bu değer çok iyidir (0.25-0.50). Ortalama ortogonal kalite değeri de Şekil 6'da 0.68 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4' e göre, bu değer iyidir (0.20-0.69). Kesici takım üzerine uygulanan sınır şartları ve kesme kuvvetleri kullanıcı tarafından girilirken, elemanlar arasında bonded türünde temas bölgeleri program tarafından otomatik olarak oluşturulmuştur (Şekil 7). Kesici takım üzerine uygulanan esas kesme kuvveti ve ilerleme kuvveti eğilme etkisi ile çekme gerilmesi oluştururken, pasif kuvvet ise basma gerilmesi oluşturacaktır. Günay ve diğerleri [16] ve Kurt [17]'un yaptıkları çalışmalarda temas türleri incelenmiştir.

Kesme analizinde kullanılan kesici uç için CBN, kesici ucun bağlı olduğu parça için HSS, takım tutucu ve diğer parçalar için çelik malzemesi kullanılmıştır. Bu parçalara ait mekanik özellikler Çizelge 1.de verilmiştir.



Şekil 2. SolidWorks ortamında modellenmiş takım tutucu, takım ucu ve altlık a), ağ (mesh) yapısı b) (tool holder, tool insert and base modeled in SolidWorks environment a), mesh structure b)

Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

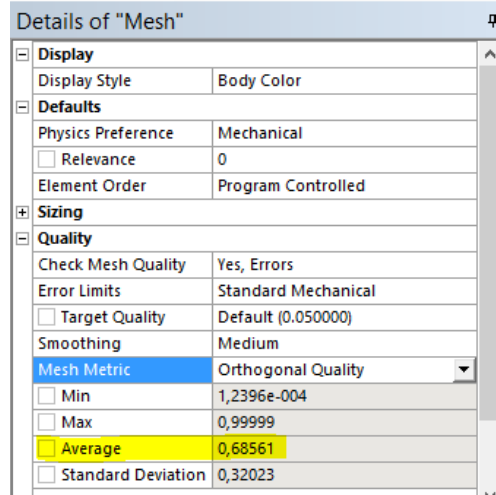
Şekil 3. Çarpıklık ağ metrikleri spektrumu (Skewness mesh metrics spectrum)

Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

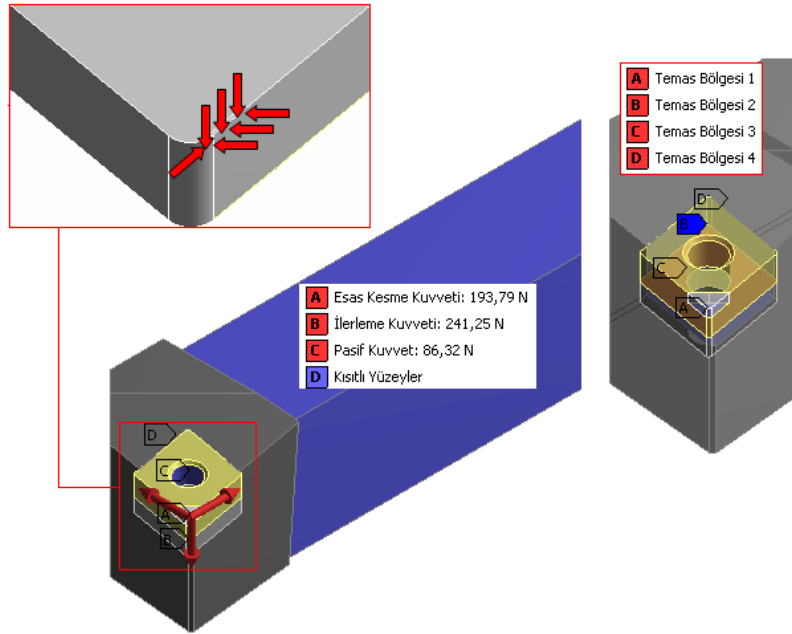
Şekil 4. Ortogonal kalite ağ metrikleri spektrumu (Orthogonal quality mesh metrics spectrum)

Details of "Mesh"	
Display	Body Color
Defaults	Physics Preference: Mechanical
	Relevance: 0
	Element Order: Program Controlled
Sizing	
Quality	Check Mesh Quality: Yes, Errors
	Error Limits: Standard Mechanical
	Target Quality: Default (0.050000)
	Smoothing: Medium
	Mesh Metric: Skewness
	Min: 1,306e-010
	Max: 0,99988
	Average: 0,4279
	Standard Deviation: 0,2703

Şekil 5. Hesaplanan ortalama çarpıklık değeri (Calculated mean skewness value)



Şekil 6. Hesaplanan ortalama ortogonal kalite değeri (Calculated mean orthogonal quality)



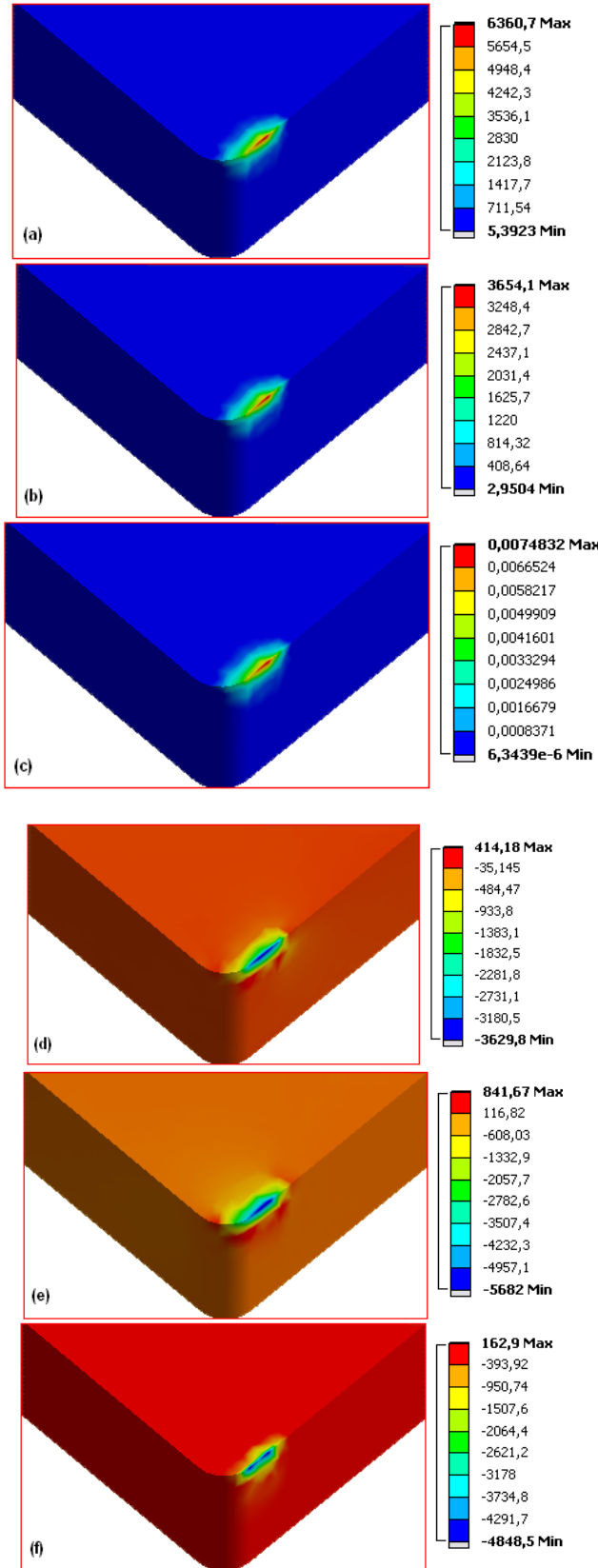
Şekil 7. Kesici takım üzerine uygulanan sınır şartları, kesme kuvvetleri ve temas bölgeleri (Boundary conditions, cutting forces and contact zones applied on cutting tool)

Çizelge 1. Kesici uca ait mekanik özellikler (Mechanical properties of the cutting tool)

Özellik	CBN [18]	HSS [4]	Çelik [19]
Elastikiyet Modülü (MPa)	$7,2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
Poisson Oranı	0,3	0,3	0,3
Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	15000	8600	7850
Akma Dayanımı (MPa)	1000	850	250

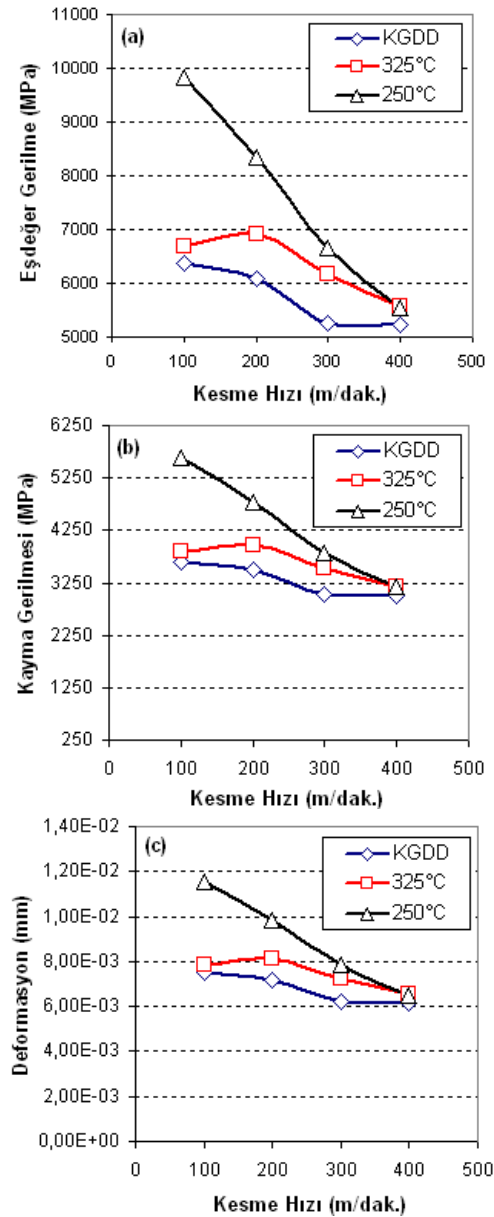
### 3. KESİCİ TAKIM ÜZERİNDE MEYDANA GELEN GERİLMELER (STRESSES ON THE CUTTING TOOL)

Uygulanan sınır şartlarından sonra analizler çözdürülmüştür. KGDD malzemesinin CBN kesici takım ile 100 m/dk kesme hızında tornalanması sonucunda takım ucunda meydana gelen eş değer gerilme (vonMises), kayma gerilmesi, X, Y ve Z yönlerindeki normal gerilmeler program tarafından hesaplanmış ve Şekil 8’ de gerilme dağılımları gösterilmiştir. Bu gerilme değerleri grafiksel olarak Şekil 9’ da verilmiştir.



Şekil 8. Gerilme a) von Mises, b) Kayma gerilmesi, c) Toplam deformasyon, d) Gx, e) Gy, f) Gz. (Stress a) von Mises, b) Shear stress, c) Total deformation, d) Gx, e) Gy, f) Gz

Grafikten ve şekilden de anlaşıldığı gibi KGDD malzemesinin CBN kesici takım ile işlenmesinden elde edilen kesme kuvvetlerinin kesici takım talaş yüzeyi, esas kesici kenar ve yardımcı kesici kenar üzerine uygulanması ile elde edilen maksimum eş değer gerilmeler esas kesici kenarın esas kesme kenarı üzerinde yoğunlaşmıştır. 100 m/dak. kesme hızında maksimum eşdeğer gerilme 6360,7 Mpa, 200 m/dak için 6081,1 Mpa, 300 m/dak için 5255,5 MPa ve 400 m/dak için 5234 Mpa olarak gerçekleşmiştir. 100 m/dak. kesme hızında maksimum kayma gerilmesi 3654,1 Mpa, 200 m/dak için 3491,1 Mpa, 300 m/dak için 3016,9 MPa ve 400 m/dak için 3000,5 Mpa olarak gerçekleşmiştir. Deformasyonlar incelendiğinde, 100 m/dak. kesme hızında maksimum deformasyon 0,0074832 mm, 200 m/dak için 0,0071542 mm, 300 m/dak için 0,0061829 mm ve 400 m/dak için 0,0061577 mm olarak gerçekleşmiştir.

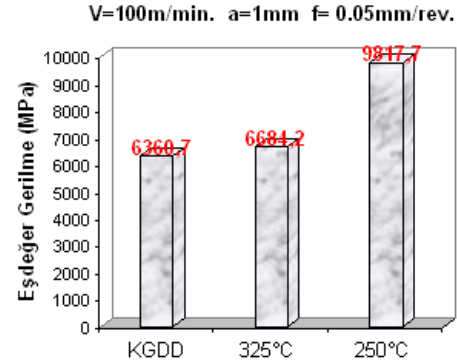


Şekil 9. Gerilmeler a) Eş değer gerilme, b) Kayma gerilmesi, c) Deformasyon (Stresses a) Equivalent stress, b) Shear stress, c) Deformation)

Şekil 10' da 100 m/dak. kesme hızında 3 farklı malzeme ile yapılan analizlerde CBN kesici takım üzerinde meydana gelen eşdeğer gerilmeler görülmektedir. KGDD malzemesi kullanılarak yapılan kesme analizinde kesici takım da meydana gelen maksimum eşdeğer gerilme 6360.7 MPa, 325°C de östemperlenmiş malzeme kullanılarak yapılan kesme analizinde kesici takım da meydana gelen maksimum eşdeğer gerilme 6684.2 MPa ve 250°C de östemperlenmiş malzeme kullanılarak yapılan kesme analizinde kesici takım da meydana gelen maksimum eşdeğer gerilme ise 9817.7 MPa olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi 250°C de östemperlenmiş malzeme kullanılarak yapılan kesme analizinde kesici takım da meydana gelen maksimum eşdeğer gerilmenin diğer iki malzeme için sözkonusu olan gerilmelerden daha yüksek olduğu saptanmıştır. Östemperlenme sıcaklığı arttıkça malzemenin sertliğinin artması, kesme durumunda kesici takım üzerinde meydana gelen kesme kuvveti dolayısıyla gerilmelerin de artmasına neden olacaktır. 250°C ve 325°C de östemperlenmiş malzemelerin kesme analizlerinden elde edilen değerler karşılaştırıldığında 325°C de elde edilen gerilmeler daha düşüktür.

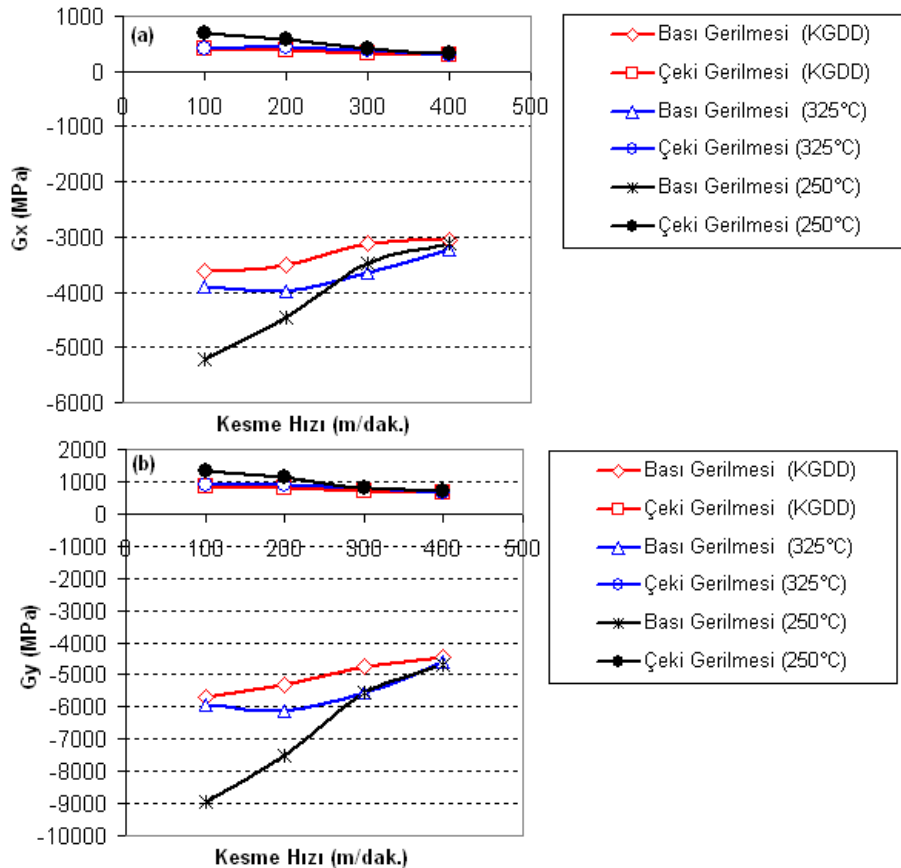
Östemperleme işlemi ile malzemelerin yapısında martenzit ve kalıntı östenit gözlenmiştir. Bu yapının oluşmasının sebebi, amaçlanan ösferrit yapısı için yeterli kadar östemperlenme süresinin kullanılmamasıdır. Böylece yapıda bir kalıntı östenik oluşmuş ve östemperleme sıcaklığıyla birlikte artmaktadır. 325°C deki malzeme yapısında daha fazla kalıntı östenit bulunmasından dolayı 250°C deki malzemeden daha

kolay kesilecektir. Sonuç olarak kesici takımında daha düşük gerilmeler ortaya çıkacaktır [15].

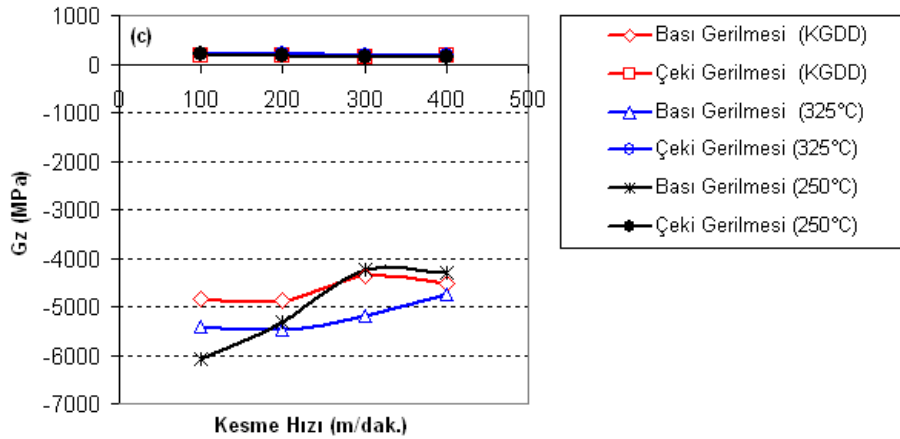


Şekil 10. 100 m/dak. kesme hızında farklı malzemeler de oluşan eş değer gerilmeler (Equivalent stresses in different materials in 100 m / min.)

Şekil 11. de kesici takım üzerinde meydana gelen normal gerilmeler X, Y ve Z yönlerinde  $G_x$ ,  $G_y$  ve  $G_z$  olarak gösterilmiştir. Her üç yöndeki gerilmeler bası ve çeki gerilmesi şeklinde gerçekleşmiştir. 250°C de östemperlenmiş malzemenin işlenmesinde, kesici takımın üzerinde meydana gelen bası ve çeki gerilmelerinin diğer malzemelere göre daha yüksek çıktığı saptanmıştır. Kesme hızının artışının çekme ve basma gerilmelerini pek etkilemediği gözlenmiştir. Aynı zamanda bası gerilmeleri, çeki gerilmelerine kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Bu durum kuvvetlerin kesici takım üzerinde basma kuvveti olarak uygulanması ile açıklanabilir.







Şekil 11. Normal gerilmeler a) Gx, b) Gy, c) Gz. (Normal stresses)

#### 4. DEĞERLENDİRME (CONCLUSION)

KGDD ve farklı sıcaklıklarda östemperlenmiş KGDD mazlemelerin işlenebilirlik testlerinden elde edilen kesme kuvvetleri değerlerinin, 3 boyutlu olarak modellenmiş kesici takımın, talaş yüzeyi, esas kesici kenar ve yardımcı kesici kenar üzerine ANSYS Workbench paket programında uygulanması ile östemperleme işleminin kesici takım gerilmeleri üzerindeki etkisi incelenen bu çalışmada.

- Kesici takım üzerinde meydana gelen maksimum eş değer gerilmeler kesici kenarın esas kesme kenarı üzerinde yoğunlaşmıştır.
- 250°C de östemperlenmiş malzeme kullanılarak yapılan kesme analizinde kesici takım da meydana gelen maksimum eşdeğer gerilmenin diğer iki malzeme için sözkonusu olan gerilmeden daha yüksek olduğu saptanmıştır. Östemperleme sıcaklığı arttıkça malzeme sertliğinin artması, kesme anında kesici takım üzerinde meydana gelen kesme kuvveti dolayısıyla gerilmelerin de artmasına neden olmaktadır. Hasırcı [20], bu çalışmada küresel grafitli dökme demirlerde (KGDD) alarım elementleri (Cu ve Ni) ilavesi ve östemperleme süresinin mikroyapı ve çekme özelliklerine etkileri incelenmiştir. Numuneler daha sonra östenitleme sıcaklığı olan 900°C'de 90 dakika bekletildikten sonra 370°C'de değişik sürelerde (60, 90, 120, 150, 180 ve 200 dakika) östemperlenmiş ve çekme deneyine tabi tutulmuştur. Östemperlenmiş numunelerin çekme dayanımlarının östemperleme süresi ile alarım elementlerinin tür ve miktarlarına bağlı olarak farklılık gösterdiği görülmüştür. Genel olarak bütün numunelerde uzun östemperleme sürelerinde karbür oluşumu sonucu akma ve çekme dayanımı artarken yüzde uzama azalmıştır.
- 250°C ve 325°C de östemperlenmiş malzemelerin kesme analizlerinden elde edilen değerler karşılaştırıldığında 325°C de elde edilen gerilmeler daha düşüktür. Östemperleme sırasında malzemelerin yapısında martenzit ve kalıntı östenit gözlenmiştir. Bu yapının oluşmasının sebebi, amaçlanan ösferrit yapısı için yeteri kadar östemperleme süresinin

kullanılmamasıdır. Böylece yapıda bir kalıntı östenik oluşmuş ve östemperleme sıcaklığıyla birlikte artmaktadır. 325°C deki malzeme yapısında daha fazla kalıntı östenit bulunmasından dolayı 250°C deki malzemeden daha kolay kesilecektir. Böylece 325°C de östemperlenmiş malzemeyi keserken CBN kesici takımında oluşan gerilmeler analizlerde olduğu gibi daha düşük olacaktır [14]. Kırçali ve Çakır [21], ostemperleme sıcaklığının ve zamanının işlenebilirlik üzerine etkisi incelenmiştir. iç yapı resimlerinde de açıkça görüleceği gibi kalıntı östenit miktarındaki değişim ostemperleme sıcaklığına ve zamanına bağlıdır. Genel olarak ostemperleme zamanının azalmasıyla kalıntı östenit miktarı artış gösterirken sıcaklığın artmasıyla da kalıntı östenit miktarında artış gözlenir.

- 250°C de östemperlenmiş malzemenin işlenmesinde, kesici takımın üzerinde meydana gelen bası ve çeki gerilmelerinin diğer malzemelere göre daha yüksek çıktığı saptanmıştır.
- Aynı zamanda, bası gerilmeleri, çeki gerilmelerine kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Bu durum kuvvetlerin kesici takım üzerinde basma kuvveti olarak uygulanması ile açıklanabilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Attanasio A, Ceretti E, Rizzuti S, Umbrello D, Micari F. "3D finite element analysis of tool wear in machining", *CIRP Annals*, 57(1): 61-4, (2008)
- [2] Kose E, Kurt A, Seker U. "The effects of the feed rate on the cutting tool stresses in machining of Inconel 718", *Journal of Materials Processing Technology*, 196(1): 165-73, (2008)
- [3] Weon Kim K, Young Lee W, Chol Sin H. "A finite-element analysis of machining with the tool edge considered", *Journal of Materials Processing Technology*, 86(1): 45-55, (1999)
- [4] Duran A, Nalbant M. "Finite element analysis of bending occurring while cutting with high speed steel lathe cutting tools", *Materials & Design*, 26(6): 549-54, (2005)
- [5] Ghani J, Wahid SW, Haron C, Nuawi M, Ab Rahman M. *The effect of uncoated carbide tool geometries in turning AISI 1045 using finite element analysis* 2009, p.271-7.

- [6] Dechjarern S. "3D finite element investigations of the influence of tool rake angle on cutting performance", *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 7(1): 53-9, (2009)
- [7] Uçun 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)
- [8] Zhou JM, Walter H, Andersson M, Stahl JE. "Effect of chamfer angle on wear of PCBN cutting tool", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(3): 301-5, (2003)
- [9] Attanasio A, Abeni A, Özel T, Ceretti E. "Finite element simulation of high speed micro milling in the presence of tool run-out with experimental validations", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2018)
- [10] Özel T, Olleak A, Thepsonthi T. "Micro milling of titanium alloy Ti-6Al-4V: 3-D finite element modeling for prediction of chip flow and burr formation", *Production Engineering*, 11(4): 435-44, (2017)
- [11] Özel T. "The influence of friction models on finite element simulations of machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(5): 518-30, (2006)
- [12] Ghani AK, Choudhury IA, Husni. "Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool", *Journal of Materials Processing Technology*, 127(1): 17-22, (2002)
- [13] Masuda M, Sato T, Kori T, Chujo Y. "Cutting performance and wear mechanism of alumina-based ceramic tools when machining austempered ductile iron", *Wear*, 174(1): 147-53, (1994)
- [14] Aslantas K, Uçun İ, Gök K. "Evaluation of the Performance of CBN Tools When Turning Austempered Ductile Iron Material", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 130(5): 054503--5, (2008)
- [15] [http://perso.crans.org/epalle/M2/MFNA/SNECMA\\_14.5\\_L08\\_Mesh\\_Quality.pdf](http://perso.crans.org/epalle/M2/MFNA/SNECMA_14.5_L08_Mesh_Quality.pdf). 2016.
- [16] Mustafa Günay, Mehmet Erdi Korkmaz, Yaşar N. "Finite Element Modeling of Tool Stresses on Ceramic Tools in Hard Turning", *Mechanics*, 23(3): 432-40, (2017)
- [17] Kurt A. "Modelling of the cutting tool stresses in machining of Inconel 718 using artificial neural networks", *Expert Systems with Applications*, 36(6): 9645-57, (2009)
- [18] Tang L, Huang J, Xie L. "Finite element modeling and simulation in dry hard orthogonal cutting AISI D2 tool steel with CBN cutting tool", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(9): 1167-81, (2011)
- [19] "ANSYSWorkbench 11.0 Material Library",
- [20] Hasırcı H. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Alasım Elementleri (Cu ve Ni) Ve Östemperleme Süresinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri. Ankara: Gazi Üniversitesi, 2000.
- [21] Kadir Kaan KIRCALI, Çakır MC. Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde östemperleme sıcaklığı ve zamanının işlenebilirliğe etkilerinin incelenmesi. *TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi*. Balıkesir26-28 Nisan 2006.



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# The influence of axial compression on the free vibration frequencies of cross-ply laminated and moderately thick cylinders

*Eksenel basıncın dik-katmanlı ve orta kalınlıkta silindirlere serbest titreşim frekanslarına etkisi*

Yazar(lar) (Author(s)): İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

ORCID: 0000-0002-2528-2978

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Çağdaş İ. U., “The influence of axial compression on the free vibration frequencies of cross-ply laminated and moderately thick cylinders”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 45-52, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.447210

# Eksenel Basıncın Dik-katmanlı ve Orta Kalınlıkta Silindirlerin Serbest Titreşim Frekanslarına Etkisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ\***

Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye

(Geliş/Received : 24.07.2018 ; Kabul/Accepted : 06.02.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, eksenel basınç altındaki dik-katmanlı kompozit silindirlerin serbest titreşim davranışları dönel atalet ve kalınlık/yarıçap oranını içeren birinci mertebeden uygun bir kayma deformasyonlu kabuk teorisine dayanan yarı-analitik bir sonlu eleman kullanılarak araştırılmıştır. Öncelikle, eksenel simetrik kabuk sonlu elemanın doğrulanması için bir çalışma yapılmış ve basıncın bulunmadığı haller için geliştirilmiş sonlu eleman ile elde edilmiş titreşim frekanslarının literatürde bulunan neti celer ile çok iyi uyum içinde olduğu görülmüştür. Aynı eleman ilk katman göçme analizi için de doğrulanmış ve kayma deformasyonlu bir eğri kabuk elemanı ile elde edilen ilk katman göçme yükleri ile iyi uyum gözlenmiştir. Daha sonra, çeşitli sınır şartlarına sahip ve burkulma ve ilk katman göçme yüklerinden düşük olacak şekilde farklı düzeylerde eksenel basınca maruz kompozit silindirler için serbest titreşim analizleri yapılmıştır. Göz önünde bulundurulmuş silindirik yapıların temel titreşim frekanslarında karşı gelen burkulma yüklerinin % 60 ila 80 nispetinde eksenel yük değerleri için hızla azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, bazı nispeten kalın silindirlerde ilk-katman göçme yükünün burkulma yükünden az olduğu da belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Titreşim, burkulma, kompozit silindir, sonlu elemanlar, basınç.

# The Influence of Axial Compression on the Free Vibration Frequencies of Cross-ply Laminated and Moderately Thick Cylinders

## ABSTRACT

In this study, the free vibration behavior of axially compressed cross-ply laminated composite cylinders is investigated using a semi-analytical shell finite element based on a consistent first order shear deformable shell theory, which includes the influences of rotatory inertia and thickness coordinate/radius ratio. First, a verification study is conducted to validate the axisymmetric shell finite element used in this study and, for the non-compressed cases, the free vibration frequencies obtained using the finite element developed are found out to be in excellent agreement with the published results found in the literature. The same element is also validated for first-ply failure analysis and good agreement is observed with the first-ply failure loads obtained using a shear deformable and curved shell element. Then, numerical results for free vibration analyses are presented for axially compressed composite cylinders having different boundary conditions and for which the level of axial compression is kept below the corresponding linear buckling and first ply failure loads. It is observed that, the fundamental free vibration frequencies decrease sharply for axial load levels higher than about 60-80% of the buckling loads of the cylindrical structures considered. It is also determined that the first-ply failure load is lower than the buckling load for some of the thicker cylinders.

**Keywords:** Vibration, buckling, composite cylinder, finite elements, compression.

## 1. INTRODUCTION

In the present study, the influence of axial compression on the vibration behavior of cross-ply laminated and moderately cylinders is numerically investigated. The primary aim here is to determine the relationship between the natural frequencies of vibration and buckling in order to be able to predict the onset of buckling.

Surveys on the dynamics of cylindrical shells can be found in the review papers of Qatu [1] and Khdeir et al. [2] and the research study of Jones et al. [3]. The influence of axial loading for homogeneous isotropic, and orthotropic cylindrical shells was treated in several

research studies found in the literature [4-13]. Armenakas [4] has investigated the influence of axial stress on the frequency of vibration of simply supported circular cylindrical shells using a bending theory. Rosen and Singer [5] have considered stiffened shells under axial compression and have presented analytical results for vibration frequency in comparison with experimental results. Bradford and Dong [6] and Greenberg and Stavsky [7] have investigated the vibratory characteristics of initially stressed laminated orthotropic cylinders. Yamada et al. [8] have investigated simply supported orthotropic cylinders under axial loads using the transfer matrix method. Chang and Lin [9] have considered simply supported and cross-ply laminated thin cylinders and have obtained a closed form solution. Greenberg and Stavsky [10] have also considered the

\*Sorumlu Yazar (Corresponding author)  
e-posta : izzetufuk@gmail.com

influence of nonuniform axial loads on the vibration characteristics of orthotropic composite cylindrical shells using a complex finite Fourier transform method. Matsunaga [11] has studied the free vibration behavior of thick circular cylinders using a higher order shell theory. Skusis *et al.* [12] have studied the vibration behavior of steel cylinders under axial compressive loads in a more recent study. Arbelo *et al.* [13] have used experimental results to determine the real boundary conditions of flat plates and cylindrical shells. However, in general, thinner composite cylinders have been studied and the first-ply failure (FPF) load, the thickness coordinate/radius ratio, and different boundary conditions taken into account here, has not been considered in these cited studies. In some of the related studies correlation of Matsunaga [11] has stated that the critical buckling stress of simply supported circular cylindrical shells subjected to initial axial stress can be predicted from the natural frequency of the shell without axial stress. Similar vibration-buckling correlation studies exist in the literature [12, 13].

The finite element numerical results are obtained here using a semi-analytical finite element, which is based on this consistent shell theory developed by Qatu [14], who obtained very accurate free vibration results for laminated composite shells by using a consistent first order shear deformable shell theory. In this theory, the  $1+z/R$  term is taken into account, where  $z$  and  $R$  denote the thickness coordinate and the radius, respectively. Using the same shell theory, Cagdas [15] has developed a curved axi-symmetric shell element, which is modified here for free vibration analysis, and Cagdas and Adali [16] have investigated the influence of pressure stiffness on the stability of cross-ply laminated moderately thick cylinders under hydrostatic pressure. In more recent studies, Cagdas [17, 18] has modified the same element for the stability and stress analysis of filament wound cones. This study is the first application of this moderately thick shell finite element to composite cylinder vibration problems including compressive loads. Also different boundary conditions are considered in this study.

In order to validate the computer code developed for free vibration analysis, comparisons with published results in the literature are made and excellent agreement with the references for non-compressed cases is observed. Also, the element is validated for FPF analysis by comparing the FPF loads obtained with the ones obtained using a 2D superparametric shell element, developed recently by Cagdas and Adali [19]. After validating the finite element developed, the influence of axial compression on the free vibration frequencies of cross-ply laminated perfect cylinders having different boundary conditions is investigated. Numerical results are presented for axial compression levels less than the corresponding linear buckling or FPF loads of the cylinders. The influences of axial compression on the vibration frequencies are demonstrated by tables and graphs. Moreover, the influence of the boundary conditions are investigated.

## 2. FINITE ELEMENT FORMULATION

Brief formulation of the semi-analytical shell element used here, which was developed recently by Cagdas [15], is given next. In this study, this shell element is modified for free vibration and FPF analyses. The finite element is based on the following displacement field;

$$\begin{Bmatrix} u_r \\ u_\theta \\ u_z \\ V_{\alpha i} \\ V_{\theta i} \end{Bmatrix} = \sum_{n=0}^m \begin{bmatrix} c_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_r^n \\ u_\theta^n \\ u_z^n \\ V_{\alpha i}^n \\ V_{\theta i}^n \end{Bmatrix} \quad (1)$$

where  $c_n$ ,  $s_n$ , and  $m$  denote  $\cos(n\theta)$ ,  $\sin(n\theta)$ , and the total number of harmonics, respectively.  $u_r^n$ ,  $u_\theta^n$ ,  $u_z^n$ ,  $V_{\alpha i}^n$ , and  $V_{\theta i}^n$  denote the radial, circumferential, and axial displacement components and the rotations in the nodal coordinate system corresponding to harmonic  $n$ , respectively. A local coordinate system  $(\alpha, \theta, z')$  is defined at a Gauss point on the mid-surface of the cylinder where  $u$ ,  $v$ , and  $w$  denote the displacements parallel to  $\alpha$ ,  $\theta$ , and  $z'$  coordinates and  $\psi_\alpha$ , and  $\psi_\theta$  are the rotations of the transverse normal about  $\theta$  and  $\alpha$  axes.  $R$ ,  $R_{ext}$ ,  $R_{int}$ , and  $H$  denote the mean radius, external radius, internal radius, and thickness respectively.

The cylinder problem considered is schematically shown in Fig. 1 excluding the restraints. The boundary conditions considered are explained in Table 1.

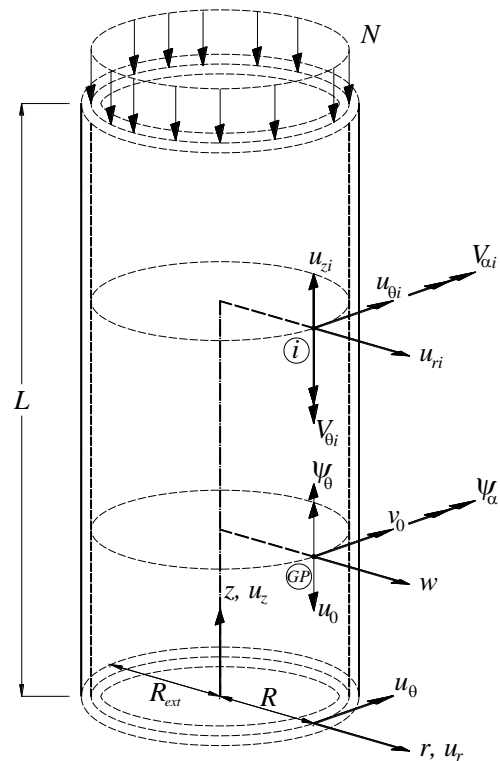


Fig. 1. Details of the cylinder problem and the global and local coordinate systems

**Table 1.** Boundary conditions considered (F:free, R:restrained) (See Fig. 1)

Name	$u_z$	$u_\theta$	$u_r$	$V_\alpha$	$V_\theta$
S3	F*	R	R	F	R
S4	F*	F	R	F	R
C3	F*	R	R	R	R
C4	F*	F	R	R	R

\*  $u_z$  is not free at the restrained end

**2.1. The Strain-Displacement Relations**

The linear and non-linear strain-displacement relations are given below;

$$\varepsilon_\alpha = \varepsilon_{0\alpha} + z' \chi_\alpha \tag{2.1}$$

$$\varepsilon_\theta = \left( \frac{1}{1+z'/R} \right) (\varepsilon_{0\theta} + z' \chi_\theta) \tag{2.2}$$

$$\gamma_{\alpha\theta} = \varepsilon_{0\alpha\theta} + \left( \frac{1}{1+z'/R} \right) \varepsilon_{0\theta\alpha} + \dots \tag{2.3}$$

$$z' \left[ \left( \frac{1}{1+z'/R} \right) \chi_{\theta\alpha} + \chi_{\alpha\theta} \right] \tag{2.4}$$

$$\gamma_{\alpha z} = \left( \frac{1}{1+z'/R} \right) (\gamma_{0\alpha z}) \tag{2.5}$$

$$\gamma_{\alpha z} = \psi_\alpha + w_{0,\alpha} \tag{2.6}$$

$$\varepsilon_{0\alpha}^{nl} = \frac{1}{2} [(u_{0,\alpha})^2 + (v_{0,\alpha})^2 + (w_{0,\alpha})^2] \tag{2.7}$$

$$\varepsilon_{0\theta}^{nl} = \frac{1}{2R^2} [(u_{0,\theta})^2 + (v_{0,\theta})^2 + (w_{0,\theta})^2 + \dots] \tag{2.8}$$

$$\varepsilon_{0\alpha\theta}^{nl} = \frac{1}{R} (-v_{0,\alpha} w_{0,\alpha} + w_{0,\alpha} v_{0,\alpha}) \tag{2.9}$$

$$\varepsilon_{0\theta\alpha}^{nl} = \frac{1}{R} (u_{0,\alpha} u_{0,\theta} + v_{0,\alpha} v_{0,\theta} + w_{0,\alpha} w_{0,\theta}) \tag{2.9}$$

and,

$$\varepsilon_0 = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{0\alpha} \\ \varepsilon_{0\theta} \\ \varepsilon_{0\alpha\theta} \\ \varepsilon_{0\theta\alpha} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (u_{0,\alpha}) \\ \frac{1}{R} (w_0 + v_{0,\theta}) \\ (v_{0,\alpha}) \\ \frac{1}{R} (u_{0,\theta}) \end{Bmatrix},$$

$$\chi = \begin{Bmatrix} \chi_\alpha \\ \chi_\theta \\ \chi_{\alpha\theta} \\ \chi_{\theta\alpha} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (\psi_{\alpha,\alpha}) \\ \frac{1}{R} (\psi_{\theta,\theta}) \\ (\psi_{\theta,\alpha}) \\ \frac{1}{R} (\psi_{\alpha,\theta}) \end{Bmatrix},$$

$$\Phi = \begin{Bmatrix} \gamma_{0\alpha z} \\ \gamma_{0\theta z} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \psi_\alpha + w_{0,\alpha} \\ \frac{w_{0,\theta}}{R} - \frac{v_0}{R} + \psi_\theta \end{Bmatrix}.$$

**2.2. The force and Moment Resultants**

The force and moment resultants are given below;

$$\begin{Bmatrix} N_\alpha \\ N_\theta \\ N_{\alpha\theta} \\ N_{\theta\alpha} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & A_{12} & \bar{A}_{16} & A_{16} \\ A_{12} & \hat{A}_{22} & \bar{A}_{26} & \hat{A}_{26} \\ \bar{A}_{16} & A_{26} & \bar{A}_{66} & A_{66} \\ A_{16} & \hat{A}_{26} & A_{66} & \hat{A}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{0\alpha} \\ \varepsilon_{0\theta} \\ \varepsilon_{0\alpha\theta} \\ \varepsilon_{0\theta\alpha} \end{Bmatrix} + \dots \tag{3.1}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{B}_{11} & B_{12} & \bar{B}_{16} & B_{16} \\ B_{12} & \hat{B}_{22} & B_{26} & \hat{B}_{26} \\ \bar{B}_{16} & B_{26} & \bar{B}_{66} & B_{66} \\ B_{16} & \hat{B}_{26} & B_{66} & \hat{B}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \chi_\alpha \\ \chi_\theta \\ \chi_{\alpha\theta} \\ \chi_{\theta\alpha} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} M_\alpha \\ M_\theta \\ M_{\alpha\theta} \\ M_{\theta\alpha} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{B}_{11} & B_{12} & \bar{B}_{16} & B_{16} \\ B_{12} & \hat{B}_{22} & B_{26} & \hat{B}_{26} \\ \bar{B}_{16} & B_{26} & \bar{B}_{66} & B_{66} \\ B_{16} & \hat{B}_{26} & B_{66} & \hat{B}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{0\alpha} \\ \varepsilon_{0\theta} \\ \varepsilon_{0\alpha\theta} \\ \varepsilon_{0\theta\alpha} \end{Bmatrix} + \dots \tag{3.2}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{D}_{11} & D_{12} & \bar{D}_{16} & D_{16} \\ D_{12} & \hat{D}_{22} & D_{26} & \hat{D}_{26} \\ \bar{D}_{16} & D_{26} & \bar{D}_{66} & D_{66} \\ D_{16} & \hat{D}_{26} & D_{66} & \hat{D}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \chi_\alpha \\ \chi_\theta \\ \chi_{\alpha\theta} \\ \chi_{\theta\alpha} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} Q_\alpha \\ Q_\theta \end{Bmatrix} = \frac{5}{6} \begin{bmatrix} \bar{A}_{55} & A_{45} \\ A_{45} & \hat{A}_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{\alpha z} \\ \gamma_{\theta z} \end{Bmatrix} \tag{3.3}$$

The rigidity terms appearing in Equations (3.1, 3.2, and 3.3) were presented by Qatu [14]. The lamination angle is taken as the angle between the fiber direction and the local  $\alpha$  axis.

**2.3. The Element Matrices**

The strain energy  $U_e$  of element  $e$  can be written as

$$U_e = \frac{1}{2} \int_A (\mathbf{N}^T \boldsymbol{\varepsilon}^0 + \mathbf{M}^T \boldsymbol{\chi} + \mathbf{Q}^T \boldsymbol{\Phi}) dA \tag{4}$$

where  $\mathbf{N} = \bar{\mathbf{A}}\boldsymbol{\varepsilon}^0 + \bar{\mathbf{B}}\boldsymbol{\chi}$ ,  $\mathbf{M} = \bar{\mathbf{B}}\boldsymbol{\varepsilon}^0 + \bar{\mathbf{D}}\boldsymbol{\chi}$ , and  $\mathbf{Q} = \bar{\mathbf{C}}\boldsymbol{\Phi}$  are defined in Equations (3.1, 3.2, and 3.3) and the element stiffness matrix is given below in Eq. (5)

$$\mathbf{K}_e^n = k\pi \int_{-1}^1 \begin{bmatrix} \mathbf{B}_\chi^T \bar{\mathbf{D}} \mathbf{B}_\chi + \mathbf{B}_\varepsilon^T \bar{\mathbf{B}} \mathbf{B}_\varepsilon + \dots \\ \mathbf{B}_\phi^T \bar{\mathbf{C}} \mathbf{B}_\phi + \mathbf{B}_\varepsilon^T \bar{\mathbf{A}} \mathbf{B}_\varepsilon + \dots \\ \mathbf{B}_\chi^T \bar{\mathbf{B}} \mathbf{B}_\varepsilon \end{bmatrix}^n (-z, \xi) R d\xi \tag{5}$$

where,  $k = 2$  for  $n = 0$ , and  $k = 1$  for  $n = 1, \dots, m$ .  $\mathbf{B}_\varepsilon$ ,  $\mathbf{B}_\chi$ ,  $\mathbf{B}_\phi$  are the strain-displacement matrices, and the superscript  $n$  stands for the  $n^{\text{th}}$  harmonic.  $\xi$  denotes the shape function coordinate.

The kinetic energy of the shell can be expressed as

$$T = \frac{1}{2} \int_{\alpha} \int_{\theta} \left[ \begin{aligned} & \left( \dot{u}_0^2 + \dot{v}_0^2 + \dot{w}_0^2 \right) \left( I_1 + I_2 \frac{1}{R} \right) + \dots \\ & \left( \dot{\psi}_\alpha^2 + \dot{\psi}_\theta^2 \right) \left( I_3 + I_4 \frac{1}{R} \right) + \dots \\ & \left( \dot{u}_0 \dot{\psi}_\alpha + \dot{v}_0 \dot{\psi}_\theta \right) \left( I_2 + I_3 \frac{1}{R} \right) \end{aligned} \right] R d\alpha d\theta \quad (6)$$

where  $\{I_1, I_2, I_3, I_4\} = \sum_{k=1}^{NL} \rho^k \{1, z, z^2, z^3\}$  and  $\rho^k$  is the mass density of the  $k^{th}$  layer of the cylinder per unit mid-surface area; see Qatu [14]. Similarly, the element mass matrix denoted by  $\mathbf{M}^{e,n}$  can be obtained.

The element geometric stiffness matrix is defined in Eq. (7)

$$\mathbf{K}_G^{e,n} = k\pi \int_{-1}^1 (\mathbf{G}^T \mathbf{S} \mathbf{G})^n (-z, \xi) R d\xi \quad (7)$$

where  $\mathbf{S}$  is a matrix of membrane stresses and  $\mathbf{G}$  is a vector of derivatives of in-plane deformations at a Gauss point.

### 2.4. Free Vibration Analysis of the Axially Compressed Structure

Before conducting the free vibration analysis of the prestressed (axially compressed) structure, the corresponding buckling load should be calculated. First, the pre-buckling deformations under given axial compressive load should be calculated. Then, the buckling load parameter can be obtained by solving the eigenvalue problem given in Eq.(8)

$$\det(\mathbf{K}^{n_1} - \lambda_{cr} \mathbf{K}_G^{n_1}) = 0 \quad (8)$$

where  $\mathbf{K}^{n_1}$  is the global stiffness matrix,  $\mathbf{K}_G^{n_1}$  is the global geometric stiffness matrix corresponding to the harmonic  $n_1$ . The critical value of  $n_1$  and the corresponding buckling load, which is equal to  $P_{cr} = P_0 \lambda_{cr}$ , are determined by trial.

The natural frequency of vibration of a cylinder under a pre-determined level of axial compressive load can be obtained by solving the eigenvalue problem given in Eq.(9)

$$\det \left[ \mathbf{K}^{n_2} - f \times \lambda_{cr} (\mathbf{K}_G^{n_2}) + (\omega^{n_2})^2 \mathbf{M}^{n_2} \right] = 0 \quad (9)$$

where,  $\omega^{n_2}$  is the circular vibration frequency and  $\mathbf{M}^{n_2}$  is the global mass matrix corresponding to the harmonic  $n_2$ . The multiplier  $f$  is a positive real number, which scales the axial compressive load level. In the present study it is assumed that,  $0 \leq f \leq 0.95$ . Buckling will generally not be the dominant failure mode for relatively thick cylinders; i.e. cylinders will fail due to excessive stress before buckling. Therefore, first-ply failure analysis using the maximum stress failure criterion is also conducted after obtaining the buckling load. If the FPF

load is less than the buckling load, then the axial load level is kept below the FPF load.

### 3. VERIFICATION PROBLEMS

The finite element used here has been verified for linear static and stability analyses by Cagdas and Adali [16], and Cagdas [15] and therefore verification problems are only presented for vibration and FPF analyses as given in the following sections.

The non-dimensional in-plane load parameter  $\bar{N}$  and the non-dimensional circular frequency  $\Omega$  are defined as

$$\bar{N} = \frac{10^6 NR}{E_1 LH}, \quad \Omega = \omega R \sqrt{\rho/E_1} \quad (10)$$

where,  $E_1$  is the modulus of elasticity in the fiber direction.

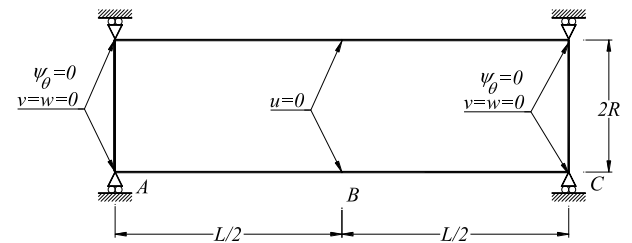
#### 3.1. Verification of the Element for Free Vibration Analysis

The problem considered here has been examined by Qatu [14], who has presented exact solutions for open cylindrical shells having two opposite edges simply supported. This type of boundary condition is also referred to in the literature as “all edges simply supported with shear diaphragm boundaries” or S3 type boundary condition as explained in Table 1; Khdeir *et al.* [2]. To be able to compare the numerical results with the reference analytical results and to prevent numerical problems,  $u_z$  is restrained only at the mid-length in the finite element model and not at the cylinder ends. The “shear-diaphragm” compatible boundary conditions used in this study are shown in Fig.2.

Free vibration frequencies of cross-ply laminated cylinders made up of a graphite-epoxy material with  $E_1 = 20.02 \times 10^6 \text{ psi}$ ,  $E_2 = 1.3 \times 10^6 \text{ psi}$ ,

$$G_{12} = 1.03 \times 10^6 \text{ psi}, \quad \nu_{12} = 0.3$$

are listed in Table1 in comparison with the results presented by Qatu [14]. For the results presented in Table 1,  $R/H=100$  and stacking sequence is  $[90^\circ/0^\circ]$ . The  $L/R$  ratio varies between 0.5 and 8. A total of 50 elements are used in the finite element model.



**Fig. 2.** The “shear-diaphragm” compatible boundary conditions. Excellent agreement with the analytical results of Qatu [14] can be observed from Table 2. It can also be observed that the accuracies of the numerical results do

**Table 2.** Frequency parameters  $\Omega$  for  $R/H=100$ ,  $[90^0/0^0]$  cylinders (material 1).

$n$	$L/R = 8$		$L/R = 4$		$L/R = 2$		$L/R = 1$		$L/R = 0.5$	
	Present Study	Qatu [14]	Present Study	Qatu [14]	Present Study	Qatu [14]	Present Study	Qatu [14]	Present Study	Qatu [14]
0	0.08907	0.08907	0.17815	0.17815	0.35629	0.35629	0.73575	0.71259	0.73078	0.73090
1	0.04925	0.04925	0.11653	0.11653	0.24079	0.24079	0.44337	0.44339	0.63562	0.63573
2	0.02182	0.02182	0.06276	0.06276	0.14667	0.14668	0.29320	0.29322	0.49547	0.49559
3	<b>0.01553</b>	<b>0.01553</b>	0.03836	0.03836	0.09770	0.09770	0.21023	0.21025	0.38987	0.38999
4	0.02143	0.02143	<b>0.03146</b>	<b>0.03147</b>	0.07183	0.07184	0.16103	0.16105	0.31682	0.31694
5	0.03296	0.03298	0.03697	0.03699	<b>0.06124</b>	<b>0.06126</b>	0.13133	0.13136	0.26676	0.26689
6	0.04785	0.04789	0.04971	0.04975	0.06308	0.06312	0.11555	0.11560	0.23332	0.23335
7	0.06562	0.06570	0.06669	0.06678	0.07425	0.07433	<b>0.11152</b>	<b>0.11160</b>	0.21256	0.21273
8	0.08618	0.08632	0.08692	0.08707	0.09162	0.09177	0.11763	0.11777	<b>0.20288</b>	<b>0.20311</b>
9	0.10948	0.10971	0.11007	0.11030	0.11336	0.11359	0.13192	0.13216	0.20295	0.20327
10	0.13552	0.13587	0.13602	0.13637	0.13856	0.13892	0.15247	0.15284	0.21162	0.21208

not significantly deteriorate with increasing mode number  $n$ . This probably is because the number of elements used was relatively high for the problem under consideration.

**3.2. Verification of the element for FPF analysis**

FPF analysis of a  $R/H=60$ ,  $L/R = 1$ , composite cylinder made up of T300/5208 material under axial compression is considered next. The S3 boundary conditions are imposed. The properties of T300/5208 graphite/epoxy pre-preg are listed in Table 3, see Ochoa and Reddy [20]. The numerical results obtained using the axisymmetric

**Table 3.** Material properties of T300/5208 graphite/epoxy pre-preg. (units: N-mm)

$E_1$	132379.37	$X_T$	1513.40
$E_2$	10755.82	$X_C$	1696.11
$E_3$	10755.82	$Y_T = Z_T$	43.78
$G_{12} = G_{13}$	5653.70	$Y_C = Z_C$	43.78
$G_{23}$	3378.43	$R$	67.57
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0.24	$S = T$	86.87
$\nu_{23}$	0.49		

shell element are given in Table 4, in comparison with the results obtained using a 2D shell element; Cagdas and Adali [16]. For both models, stresses are extrapolated from the Gauss points to the element corner nodes. As can be seen from Table 4 the maximum difference between the 2D shell element results and the axisymmetric shell element results is less than 3% for all of the cases considered. A refined mesh is required to

obtain plausible FPF analysis results using the 2D shell elements. However, it should be noted that, excessive mesh refinement may result in errors when using the 2D shell element. It is observed that, if, due to mesh refinement, the thickness of the 2D shell element becomes less than  $1/4$  of the element's shorter edge length a finer mesh may yield unreliable results. The axisymmetric element does not demonstrate such behavior.

**Table 4.** FPF load parameters  $\bar{N}_{FPF}$  for  $R/H=60$ ,  $L/R = 1$ , S3 B.C., material T300/5208.

Lay-up	Axisym.(50 el.)	2D (32x10)
[90/90]s	112465	115469
[0/0]s	3482472	3394267
[90/0]s	756430	767994
[0/90]s	812289	814023

**3.3. Verification of the element for free vibration analysis including axial stress**

Before proceeding with the numerical study, the numerical results presented by Greenberg and Stavsky [10] for two layered cross-ply laminated composite cylinders under  $10^4$ lbs/in. axial compressive force with S3 B.C. are compared with the results obtained in this study; see Table 5. Note that, the inner layer has fibers aligned in circumferential direction with a thickness of 4 mm and the total thickness is equal to 10 mm. The material properties used by Greenberg and Stavsky [10] are;  $E_1 = 19 \times 10^9 N/m^2$ ,  $E_2 = 7.6 \times 10^9 N/m^2$

**Table 5.** Free vibration frequencies  $\omega(n)/10^3$  (sec<sup>-1</sup>) for  $R/H=20$ , S3 B.C.

$L/R$	Donnel theory [10]	Love-type Theory [10]	Greenberg and Stavsky [10]	Present Study
.5	16.05 (4)	15.39 (4)	10.40 (4)	9.61 (4)
.9	9.02 (4)	8.45 (3)	6.51 (4)	5.96 (4)
2	4.86 (3)	4.33 (3)	3.96 (3)	3.27 (3)
4	2.92 (4)	2.41 (2)	2.65 (2)	2.04 (2)



**Table 6.** Frequency parameters  $\Omega$  for  $R/H=60$ ,  $[90^\circ/0^\circ]_s$ ,  $L/R=1$  cylinder.

$n_2$	$f=0.00$	$f=0.25$	$f=0.50$	$f=0.75$	$f=0.80$	$f=0.90$	$f=0.95$
0	0.6492	0.6487	0.6459	0.6426	0.6406	0.6382	0.6319
1	0.4134	0.4125	0.4080	0.4029	0.3996	0.3959	0.3938
2	0.2714	0.2701	0.2632	0.2551	0.2499	0.2439	0.2406
3	0.1980	0.1962	0.1867	0.1751	0.1674	0.1583	0.1531
4	0.1645	0.1623	0.1506	0.1360	0.1259	0.1135	0.1062
5	<b>0.1626</b>	<b>0.1605</b>	<b>0.1486</b>	<b>0.1338</b>	<b>0.1236</b>	<b>0.1109</b>	<b>0.1033</b>
6	0.1876	0.1858	0.1756	0.1632	0.1550	0.1419	0.1173
7	0.2324	0.2309	0.2228	0.2132	0.2069	0.1819	0.1462
8	0.2913	0.2901	0.2837	0.2762	0.2690	0.2439	0.2121
9	0.3610	0.3600	0.3549	0.3489	0.3410	0.3188	0.2951
10	0.4398	0.4390	0.4348	0.4300	0.4230	0.4051	0.3868

**Table 7.** Frequency parameters  $\Omega$  for  $R/H=60$ ,  $[90^\circ/0^\circ]_s$ ,  $L/R=10$  cylinder.

$n_2$	$f=0.00$	$f=0.25$	$f=0.50$	$f=0.75$	$f=0.80$	$f=0.90$	$f=0.95$
0	0.0649	0.0648	0.0646	0.0642	0.0641	0.0638	0.0637
1	0.0380	0.0379	0.0374	0.0367	0.0365	0.0361	0.0358
2	<b>0.0222</b>	<b>0.0219</b>	<b>0.0211</b>	<b>0.0197</b>	<b>0.0193</b>	<b>0.0185</b>	<b>0.0180</b>
3	0.0358	0.0357	0.0352	0.0342	0.0340	0.0334	0.0331
4	0.0660	0.0659	0.0656	0.0648	0.0644	0.0633	0.0624
5	0.1059	0.1059	0.1057	0.1043	0.1036	0.1010	0.0984
6	0.1547	0.1546	0.1547	0.1522	0.1509	0.1402	0.1130
7	0.2118	0.2118	0.2136	0.2084	0.2298	0.1794	0.1455
8	0.2771	0.2771	0.2788	0.2808	0.2857	0.2404	0.2125
9	0.3504	0.3504	0.3522	0.4045	0.3972	0.3171	0.2954
10	0.4312	0.4312	0.4327	0.4510	0.4528	0.4037	0.3870

$G_{12} = 4.1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ,  $G_{13} = 19 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ,  
 $G_{23} = 19 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ,  $\rho = 1.643 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu_{12} = 0.3$ .  
As can be observed from Table 5, there are considerable differences between different shell theories and the results obtained in this study are lower than the results presented by Greenberg and Stavsky [10], even though shear deformation was considered in [10]. The differences may be attributed to the influence of thickness coordinate/radius ratio considered in the present study.

#### 4. NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSION

The problem under consideration is the determination of the free vibration frequencies of cross-ply laminated cylinders under pre-determined levels of axial compressive load. The axial compressive load is limited to the corresponding critical buckling load or to the FPF load of the cross-ply cylinder analyzed.

##### 4.1. Numerical Results

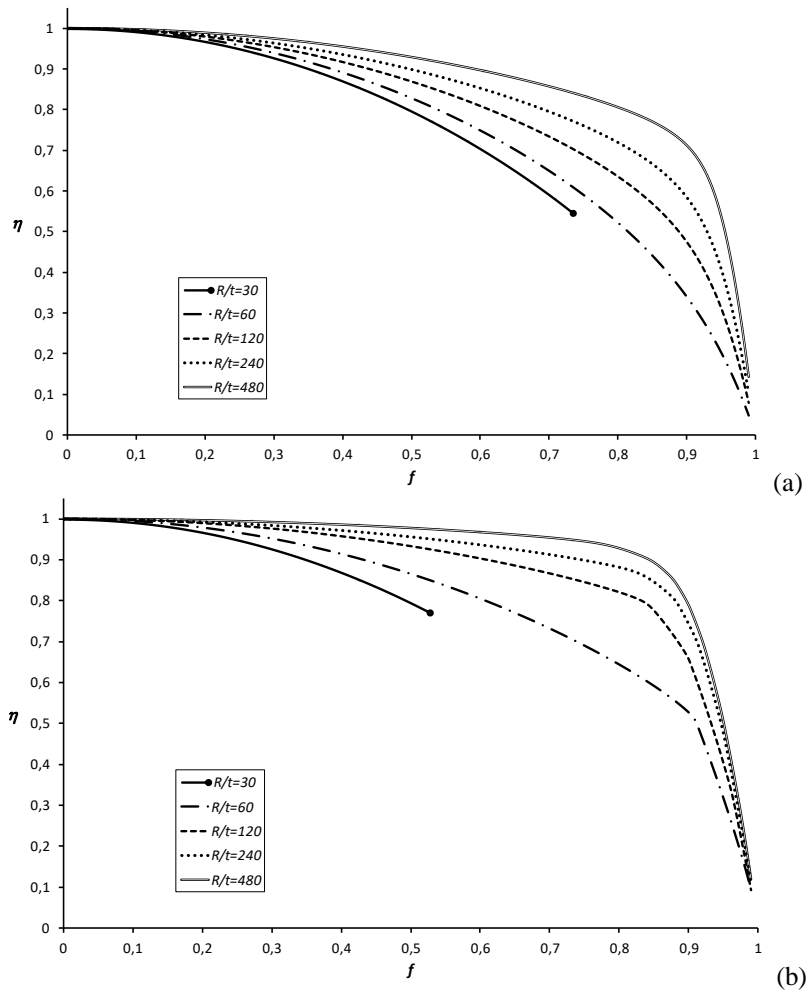
In the following sub-sections the numerical results obtained using 50 axisymmetric finite elements for the selected problems are given both in tabular and graphical forms. The material used is specified as T300/5208

graphite-epoxy for which material properties are given in Table 3. The non-dimensional thicknesses of the  $0^\circ$  and  $90^\circ$  plies are given by  $h_0 = H_0/H$  and  $h_{90} = H_{90}/H$ , respectively, where  $H_0$  and  $H_{90}$  are the thicknesses of  $0^\circ$  and  $90^\circ$  plies.

##### 4.1.1. The influence of L/R ratio

In Table 6, numerical results are presented for S3 B.C.,  $h_{90}=0.25$ ,  $L/R=1$  and  $H=R/60$  and for several values of  $f=[0,0.95]$ . The non-dimensional buckling load  $\bar{N}_{cr} = 713160$ , and the corresponding critical wave number  $n_{cr}=6$  and  $\bar{N}_{FPF} = 756430$  (see Table 3) for this case.

As can be observed from Table 6, for the non-compressed case, i.e. for  $f=0$ , the 5<sup>th</sup> harmonic gives  $\Omega_{\min}=0.1626$ , which is the lowest vibration frequency and  $\Omega$  values decrease with increasing  $f$  for all of the  $n_2$  values considered. Also, the value of  $n_{2,\min}$  does not change for  $f \leq 0.95$  and the numerical results show that there is a smooth decrease up to  $f=0.9$  and a sharp decrease after higher axial compressive load level is reached. This sudden change is a warning of buckling and may be helpful while inspecting or monitoring related structures. Another observation that can be made from



**Fig. 3.** Variations of  $\eta$  with  $R/t$  and  $f$  for  $L/R=1$ ,  $[90^\circ,0^\circ]_s$  (a) S4 (b) C4

Table 6 is that, the negative influence of axial compression on the free vibration frequency is very high for some  $n_2$  values, especially for the ones corresponding to the lowest natural frequency and the buckling mode shape. Here, for the cases considered,  $f=0.75$  leads to a reduction of around 20% in  $\Omega_{\min}$  and the other frequency values are reduced less. The decrease in  $\Omega$  with increasing  $f$  is more pronounced for  $n_2=5$  and 6. These preliminary results obtained show that the negative influence of axial compression on the free vibration behavior will be lower if appropriate safety factors are used against buckling.

Numerical results are also presented in Table 7 for  $L/R=10$ , in order to investigate the influence of cylinder  $L/R$  ratio. For this case,  $\bar{N}_{cr}=88740$ ,  $n_{cr}=6$  and  $\bar{N}_{FPF}=106266$ . It can be observed from Table 7 that, for  $L/R=10$ , the negative influence of axial compression is lower comparing with the case  $L/R=1$ .

#### 4.1.2. Buckling and FPF critical cylinders

The percentage difference denoted by  $\eta$  is defined as

$$\eta^n = \frac{(\Omega^{n,f=0} - \Omega^{n,f \neq 0})}{\Omega^{n,f=0}} \times 100$$

where  $\Omega^{n,f \neq 0}$ ,  $\Omega^{n,f=0}$  denote the  $n^{\text{th}}$  vibration mode non-dimensional frequencies corresponding to the cases  $f \neq 0$  and  $f = 0$ .

It can be observed from Figures 3(a) and 3(b) that, the influence of axial compression on the free vibration frequencies is higher for thicker cylinders and thicker cylinders more rapidly loose rigidity with increasing axial compression level comparing with thinner cylinders especially for  $f < 0.8$ . The curvature of the  $\eta$  curve changes rapidly for  $f > 0.8$  and the behavior is only slightly different for S4 and C4 boundary conditions. It can also be observed that the decrease in omega with increasing  $f$  is unexpectedly lower for thinner cylinders.

The results obtained, in general, show that it may not be possible to correlate free vibration and buckling parameters. Different boundary conditions are also considered and the vibration frequency-buckling load correlation is shown to be related with the boundary conditions. However, its influence is found out to be limited. However, as expected cylinders with C4 BC are more stiff comparing with the cylinders with S4 BC.

#### 4. CONCLUSIONS

A finite element formulation for free vibration analysis of axially compressed, moderately thick, cross-ply laminated composite cylinders is presented. Firstly, some verification problems are solved and the high accuracy of the element in free vibration and FPF analyses is demonstrated. The free vibration frequencies obtained for the non-compressed cases are found out to be in excellent agreement with the analytical results found in the literature. Then, the effects of the axial compression, geometry, end conditions, and the stacking sequence on the free vibration frequencies are investigated. Numerical results for free vibration analyses are presented for axially compressed cylinders having different boundary conditions and for which the level of axial compression is kept below the corresponding linear buckling and the first ply failure loads. The numerical results show that, the related natural frequencies decrease somewhat linearly with increasing axial compressive load levels up to about 70~80% of the buckling loads of the structures considered and decrease non-linearly for higher load levels. Therefore, it is deduced that, it may, in practical applications, be possible to predict the onset of buckling by monitoring the change of the natural frequencies under increasing axial compressive load levels. It is also revealed that the decrease in frequency parameters is more pronounced for the mode shapes corresponding to the lowest frequency, i.e. not for the ones corresponding to the buckling mode shapes.

The most important outcome of this study for design purposes is that, the negative influence of axial compression is found out to be the reduction of the minimum natural frequency by about 20% even for  $f=0.75$ . Also, it is revealed that higher  $L/R$  ratios lead to lower reduction and for thick cylinders, for which the buckling load is lower than the FPF load, the reduction in free vibration frequency will be much lower.

#### REFERENCES

- [1] Qatu, Mohamad S. "Recent research advances in the dynamic behavior of shells: 1989-2000, Part 1: Laminated composite shells", *Applied Mechanics Reviews*, 55(4): 325-350, (2002).
- [2] Khdeir, A. A., J. N. Reddy, and D. Frederick. "A study of bending, vibration and buckling of cross-ply circular cylindrical shells with various shell theories", *International Journal of Engineering Science*, 27(11): 1337-1351, (1989).
- [3] Jones, Robert M., and Harold S. Morgan. "Buckling and vibration of cross-ply laminated circular cylindrical shells", *AIAA Journal*, 13(5): 664-671, (1975).
- [4] Armenakas, Anthony E. "Influence of initial stress on the vibrations of simply supported circular cylindrical shells", *AIAA Journal*, 2(9): 1607-1612, (1964).
- [5] Rosen, Aviv, and Josef Singer. "Vibrations of axially loaded stiffened cylindrical shells", *Journal of Sound and Vibration*, 34(3): 357-IN3, (1974).
- [6] Bradford, L. G., and S. B. Dong. "Natural vibrations of orthotropic cylinders under initial stress", *Journal of Sound and Vibration*, 60(2): 157-175, (1978).
- [7] Greenberg, J. B., and Y. Stavsky. "Vibrations of axially compressed laminated orthotropic cylindrical shells, including transverse shear deformation", *Acta Mechanica*, 37(1-2) : 13-28, (1980).
- [8] Yamada, Gen, Toshihiro Irie, and Mitsuo Tsushima. "Vibration and stability of orthotropic circular cylindrical shells subjected to axial load", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 75(3): 842-848, (1984).
- [9] Chang, Jeng-Shian, and Chen-Hong Lin. "Buckling and free vibration of cross-ply laminated circular cylindrical shells subjected to axial thrust and lateral pressure loading according to a higher order displacement field", *Thin-Walled Structures*, 13(3): 177-196, (1992).
- [10] Greenberg, J. B., and Y. Stavsky. "Vibrations and buckling of composite orthotropic cylindrical shells with nonuniform axial loads", *Composites Part B: Engineering*, 29(6): 695-70, (1998).
- [11] Matsunaga, H. "Free vibration of thick circular cylindrical shells subjected to axial stresses", *Journal of Sound and Vibration*, 211(1): 1-17, (1998).
- [12] Skukis, E., K. Kalnins, and A. Chate. "Preliminary assessment of correlation between vibrations and buckling load of stainless steel cylinders", *Shell Structures Theory and Applications*, CRC Press, London, (2013).
- [13] Arbelo, Mariano A., et al. "Vibration correlation technique for the estimation of real boundary conditions and buckling load of unstiffened plates and cylindrical shells", *Thin-Walled Structures*, 79: 119-128, (2014).
- [14] Qatu, Mohamad S. "Accurate equations for laminated composite deep thick shells", *International Journal of Solids and Structures*, 36(19) : 2917-2941, (1999).
- [15] Çağdas, İzzet U. "Stability analysis of cross-ply laminated shells of revolution using a curved axisymmetric shell finite element.", *Thin-Walled Structures*, 49(6): 732-742, (2011)
- [16] Çağdas, İzzet U., and Sarp Adalı. "Buckling of cross-ply cylinders under hydrostatic pressure considering pressure stiffness", *Ocean engineering*, 38(4) : 559-569, (2011).
- [17] Çağdas, İzzet U. "Optimal design of filament wound truncated cones under axial compression." *Composite Structures*, 170: 250-260, (2017)
- [18] Çağdas, İzzet U. "Optimal design of variable stiffness laminated composite truncated cones under lateral external pressure", *Ocean Engineering*, 145: 268-276, (2017)
- [19] Çağdas, İzzet U., and Sarp Adalı. "Effect of Fiber Orientation on Buckling and First-Ply Failures of Cylindrical Shear-Deformable Laminates", *Journal of Engineering Mechanics*, 139(8) : 967-978, (2013).
- [20] Ochoa, Ozden O., and Junuthula Narasimha Reddy. "Finite element analysis of composite laminates", Springer, Dordrecht, (1992).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# A monte-carlo simulation for the estimation of side-by-side loading events on oregon bridges

## *Oregon köprülerinde yan yana araç yüklemelerinin tahmini için bir monte carlo simülasyonu*

*Yazar(lar) (Author(s)): Arcan YANIK<sup>1</sup>, Christopher HIGGINS<sup>2</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-2527-4812*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-2443-0369*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Yanık A. ve Higgins C., “A monte-carlo simulation for the estimation of side-by-side loading events on oregon bridges”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 53-60, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.469495

# A Monte-Carlo Simulation for the Estimation of Side-by-Side Loading Events on Oregon Bridges

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Arcan YANIK<sup>1,2\*</sup>, Christopher HIGGINS<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Istanbul Technical University, Maslak, 34469, Istanbul, Turkey.

<sup>2</sup>Oregon State University, School of Civil and Construction Engineering, Corvallis, 97331, Oregon, USA.

(Geliş/Received : 11.10.2018 ; Kabul/Accepted : 19.02.2019)

## ABSTRACT

Obtaining the side-by-side probabilities accurately is a very important procedure during two lane loaded live load factor analysis. To calculate the load factors properly, side-by-side loading events should be investigated very carefully. This study presents a statistical method to investigate the side-by-side events on the Oregon bridges. Numerical simulations were performed for this investigation. These simulations were developed in MATLAB. Gross vehicle weights (GVW) of the trucks were used during the analysis. Monte Carlo simulations were performed to analyze side-by-side loading events. Degree of correlation coefficient of GVW for side-by-side trucks were also obtained from Monte Carlo simulations. 290 bridges located at the prescribed mile markers on Interstate-5 (I-5) southbound on Oregon highways and 1-year of Oregon state-specific weigh-in-motion (WIM) data were used. 75,000 trucks were randomly selected from 1,787,612 trucks that correspond to 1-year WIM data from Woodburn NB traffic site that is located in Oregon. Inverse standard normal distribution functions and cumulative distribution functions of the truck data were generated. With respect to the statistical analysis, side-by-side loading probabilities were found to be smaller than the ones presented in American Association of State Highway and Transportation Officials LRFD calibration.

**Keywords:** Bridge, civil engineering, highway, monte carlo simulation, side-by-side loading.

## Oregon Köprülerinde Yan Yana Araç Yüklemelerinin Tahmini için Bir Monte Carlo Simülasyonu

### ÖZ

İki şeritli yollardaki hareketli yük katsayılarının tayininde, yan yana araç yükleme belirlenmesi çok önemli bir aşamadır. Yük katsayıları belirlenirken yan yana araç yüklemeleri çok dikkatli bir şekilde hesaplanmalıdır. Bu çalışmada, Amerika'da bulunan Oregon eyaleti köprülerindeki yan yana araç yüklemelerinin ve brüt araç ağırlıkları korelasyon katsayılarının tayini için istatistiksel bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntemde bir Monte Carlo simülasyonu geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Hesaplamalar esnasında kamyonların brüt araç ağırlıkları göz önüne alınmıştır. Analizlerde MATLAB programında hazırlanan sayısal simülasyonlar kullanılmıştır. Sayısal simülasyonlarda, Oregon eyaletindeki eyaletler arası I-5 otoyolunda, güneye giden doğrultuda bulunan 290 köprünün bilgileri ve 1,787,612 adet kamyonun, hareket halinde tartma (WIM) verileri kullanılmıştır. Köprü verileri köprülerin I-5 otoyolu üzerindeki geçiş km değerleri, bir diğer deyişle gerçek mil işaretlemeleri ve gerçek köprü uzunluklarıdır. Monte Carlo simülasyonlarında ayrıca 75,000 adet rassal (rastgele seçilmiş) kamyon kullanılmıştır. Bu kamyon verileri kullanılarak standart normal dağılım fonksiyonları ve kümülatif dağılım fonksiyonları hesaplanmıştır. İstatistiksel analizler sonucunda yan yana yükleme olasılıkları, Amerikan otoyol ve taşıma standartlarını belirleyen kurum olan AASHTO'nun hazırladığı köprü tasarım şartnamelerindeki (LRFD) değerlerinden daha düşük olarak bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Köprüler, inşaat mühendisliği, karayolu, monte carlo simülasyonu, yan yana yükleme.

### 1. INTRODUCTION

Weigh-in-motion (WIM) devices are designed to capture and record the axle weights, and gross vehicle weights as vehicles drive over a measurement site. WIM data are obtained from the measurement of these devices, during the traffic. In load factor calculations [1-2] WIM data is being used widely. A method was proposed in [4] for calculating site-specific load factors, using truck weight data from WIM sites that follows the format used in the derivation of live load factors contained in the specifications [3]. This approach is to determine the statistics associated with the Oregon type truck (3S2 truck) population to characterize the uncertainty

associated with the alongside truck. Accurate calculation of multi-lane load factors is crucial during the estimation of side-by-side loading events. The investigation on multi-lane load factors and side-by-side loading events have being studied by researchers during the last decade [5-7]. The jurisdictional and enforcement characteristics of Oregon, the modifications used to describe the alongside truck population based on the unique truck permitting conditions in the state, the WIM data filtering, sorting, and quality control, as well as the calibration process, and the computed live load factors, were presented in [5]. A framework for multi-lane factors (MLFs) for bridge traffic loading was proposed in [6]. Example application of the framework of a site using WIM data was demonstrated in their study. Two, three, and four-lane transverse reduction factor based on

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : yanikar@itu.edu.tr

probability theory and the recently actual traffic flow data were presented in [7]. Live load factors of Oregon bridges were calculated by using WIM data and statistical approaches in [8]. Distribution factor equations that accurately predict the distribution factor of the decked precast and prestressed concrete girder bridge systems when it is subjected only to single-lane loading were given in [9]. Lately Monte Carlo simulation is being studied increasingly in bridge engineering research [10-15]. However, side-by-side loading event estimation studies through Monte Carlo simulation are rare. A comprehensive model for Monte Carlo simulation of bridge loading for free-flowing traffic and presentation of how the model matches results from measurements on five European highways was given in [10]. Through Monte Carlo simulation, seismic analysis was carried out to take into account the variability of certain factors relating to the seismic input of a bridge in [11]. Monte Carlo Simulation technique was integrated to quantitatively estimate the basic probabilities and to produce robust overall bridge condition ratings in [12]. In order to estimate the probabilistic response of a bridge, obtaining the simulation number with the exact solution through Monte Carlo Simulation and determining the type of statistical distribution were carried out in [13]. The dynamic response of floating bridges subjected to harsh weather condition was predicted in the time domain using Monte Carlo simulations in [14]. A framework for probabilistic analysis of bridge networks based on system reliability and Monte Carlo simulation was carried out in [15]. An interesting Monte Carlo simulation application was studied to provide the probable effect of bismuth shielding on dose reduction to organs and investigation of applicability of Monte Carlo (MC) method in [16]. A statistical regression analysis on the estimation of the amount of earthquake induced permanent Ground displacements using strong ground motion records in Turkey was carried out in [17].

As it can be indicated from the previous paragraph, Monte Carlo simulation integration on bridge studies are mostly on seismic analysis of the bridges, bridge rating, probabilistic response of the bridges, time domain analysis and reliability analysis. However, a Monte Carlo simulation process on side-by-side loading analysis, for the Ohio WIM data was performed in [18]. This is one of the few studies on Monte Carlo implementation on side-by-side loading event calculation. In their example the number of trucks in the sample was 1,530. It was suggested in [18] that, the higher number of data sample available to the number of data points extracted, the better the results. Therefore, in this study 75,000 trucks were used in the analysis.

In this paper Monte Carlo simulation was implemented for the estimation of side-by-side loading events on Oregon bridges. A MATLAB code was written for performing the simulations. For calculating side-by-side loading events 290 bridges on I-5 highway were considered during the simulation procedure. I-5 is the main interstate highway on the West Coast of the United

States, running largely parallel to the Pacific coast of the continental U.S. from Mexico to Canada. Average daily traffic data (ADTT) effect was considered in the simulations. Therefore 1-year data from WIM site of Woodburn Northbound (NB), which has the highest traffic density among the Oregon highways were used in the analysis. After performing Monte Carlo simulations through the 290 bridges on I-5 southbound, the side-by-side loading probabilities were obtained. The results were compared with the ones given in the calibration of [3].

## 2. MONTE CARLO SIMULATION FOR SIDE-BY-SIDE LOADING EVENTS

In this section before presenting the specific Monte Carlo Simulation approach for side-by-side loading events in Oregon bridges, information on Monte Carlo Simulation method is given.

### 2.1 Monte Carlo Simulation Method

Monte Carlo simulation is an efficient approach for the reliability analysis of engineering systems. In Monte Carlo simulation method, the uncertainties are defined with random variables. Although the values of random variables in a certain case are unknowns, the numerical range of the values of these random variables can be obtained. To obtain these values, firstly random numbers that vary between 0 and 1 are generated. After that, by using inverse cumulative distribution method (CDF), the numbers are transformed into random numbers that are generated for uniformly distributed variables [19-20]. Then the problem is evaluated deterministically for each set of realizations of all the random variables. The other step is the extraction of probabilistic information from N number of realizations. And lastly the accuracy of the method is determined. In this study, normal distribution was used as a distribution function, as it is suitable for the random parameters generated in this paper. However, there are several distribution functions like log-normal, uniform, Weibull, exponential etc. The Monte Carlo method is defined briefly with the basic equations below. In generating random numbers, CDF of the random variable is equated to the generated random variable with the following formula [20].

$$x_i = F_x^{-1}(x_i) = u_i \quad (1)$$

where CDF of a random variable is a method to describe the distribution of random variables. In Eq. 1,  $x_i$  is the certain value and  $F(x)$  is the CDF which can be presented as

$$F_x(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{S_x \sqrt{2\rho}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2S_x^2}} dx \quad (2)$$

where  $m_x$  is the mean of the random variables and  $S_x$  is the standard deviation of them and the normal

distribution formula is written below

$$F(x, S, m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S} e^{-\frac{(x-m)^2}{2S^2}} \quad (3)$$

For the solution of CDF which has normal distribution that is given in Eq. 1, the random numbers ( $u_i$ ) between 0 and 1 are converted to standard normal random numbers ( $s_i$ ) as given below

$$s_i = \frac{x_i - m_x}{S_x} \quad (4)$$

The CDF of standard normal random parameter can be defined as

$$F(s) = \int_{-\infty}^s \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{s^2}{2}} ds \quad (5)$$

and then this expression is equated with  $u_i$  as shown below

$$u_i = F_x(x_i) = F(s_i) = F\left(\frac{x_i - m_x}{S_x}\right) \quad (6)$$

lastly the  $x_i$  of the random variable  $X$  with normal distribution can be obtained as

$$x_i = m_x + S_x s_i \quad (7)$$

More information on Monte Carlo simulation can be obtained in [20-21]. The statistical approach and Monte Carlo simulation for the specific problem studied in this paper is defined below.

### 2.2 Calculation of Side-by-Side Loading Events for Oregon Bridges

WIM data time stamps and Monte Carlo simulation of statistical load effects were used to establish side-by-side loading events. Details of Woodburn NB records are shown in Table 1. The multiple presence factors of the trucks and degrees of correlation coefficients were obtained using Monte Carlo simulations.

**Table 1.** Details of Woodburn NB WIM records

Corridor	Site Location	Site Designation	ADTT	All Year Data
I-5	Woodburn NB	WBNB	5550	1,787,612

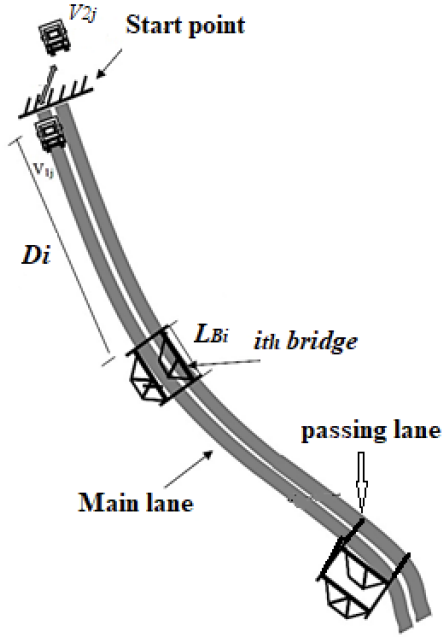
The real bridge span lengths and starting milepost locations along I-5 southbound were used in the Monte Carlo simulation procedure. While the WIM data from Woodburn NB was used for selecting 75,000 random trucks. The bridges included in the simulations are reported in [8]. The first page of the bridge log (mile markers, bridge names, and total bridge length) is given in the Appendix of this paper. However, the information of the remaining bridges can be found in [8]. The bridge log was obtained from Oregon Department of Transportation (ODOT). There were a total of 290 bridges included in the simulations. The Monte Carlo simulation process was executed by as follows:

- Assemble the GVW data representing the trucks from the Woodburn NB WIM site in the truck travel lane into a population consisting of 75,000 trucks (correspond to two weeks of WIM data ADTT = 5,000). Randomly select 75,000 trucks out of the 1-year population of WIM data consisting of 1,787,612 trucks.
- Assemble the GVW data representing the trucks from the Woodburn NB WIM site in the passing lane into a population consisting of 75,000 trucks (correspond to two weeks of WIM data with ADTT = 5,000). Randomly select 75,000 trucks out of 1-year of WIM data consisting of 1,787,612 trucks.
- Randomly select the truck identification number (truck id), truck GVW, truck velocity from the main lane population by implementing Monte Carlo method.
- Randomly select the truck identification number (truck id), truck GVW, truck velocity and the real time stamp that was calculated from the real WIM data from the passing lane population by implementing Monte Carlo method.
- Calculate the arrival and leaving time of the truck from the main lane population to the real bridge on I-5 considering the distance and length of the bridge.
- Calculate the arrival and leaving time of the truck from the passing lane population to the real bridge on I-5 by taking into account of the real time stamp of the passing lane truck.
- Compare all the arrival and leaving times of the trucks from the main lane and passing lane. If the arrival or leaving times are equal for the main lane and passing lane trucks, then it is a single side-by-side event. And the corresponding side-by-side trucks should be taken out of the populations.
- Repeat the whole Monte Carlo simulation process for each of the 290 bridges on I-5 southbound.
- Take the sum of all the single events for each bridge to obtain the total of side-by-side events on the corresponding bridges.
- Divide the number of side-by-side events by total number of trucks (75,000) to obtain the side-by-side probability.
- Store the GVW and truck id information of the side-by-side trucks for each bridge.

Calculation of the arrival and departure times of the trucks from the main lane and passing lane over a single bridge is illustrated in Figure 1.

The arrival time of the truck in the main lane to the bridge can be written as:

$$T_{1A} = D_i / V_{1j} \quad (8)$$



**Figure 1.** Illustration of simulation of truck coincidence on bridges along I-5.

where  $D_i$  is the distance of the  $i$ th bridge ( $i=1\dots290$ ) to the starting point on I-5 southbound. And  $V_{1j}$  is the velocity of the  $j$ th truck ( $j=1\dots75,000$ ) on the main lane as depicted in Figure 2. The leaving time from the bridge can be expressed as:

$$T_{1L} = D_i + L_{Bi} / V_{1j} \quad (9)$$

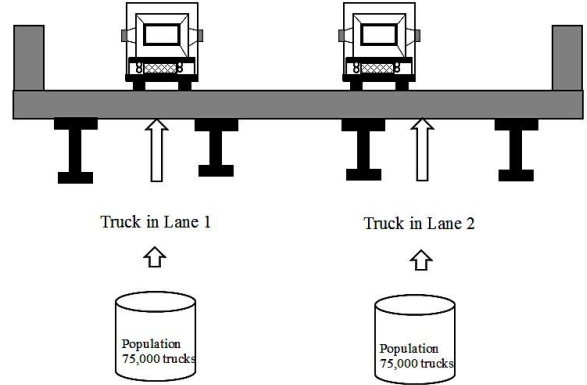
where  $L_{Bi}$  is the length of the  $i$ th bridge on I-5 southbound. The arrival time of the truck on passing lane to the  $i$ th bridge is

$$T_{2A} = D_i / V_{2j} + \Delta t_j \quad (10)$$

in this equation  $V_{2j}$  is the velocity of the  $j$ th truck on passing lane,  $\Delta t_j$  is the time separation between the truck on the main lane and  $j$ th truck on the passing lane. Time separation values were obtained from the real WIM data time stamps. The actual time stamps throughout the full year of Woodburn NB WIM site data were used to generate time separation  $\Delta t_j$  for each truck. The leaving time of the truck on passing lane to the  $i$ th bridge were calculated as:

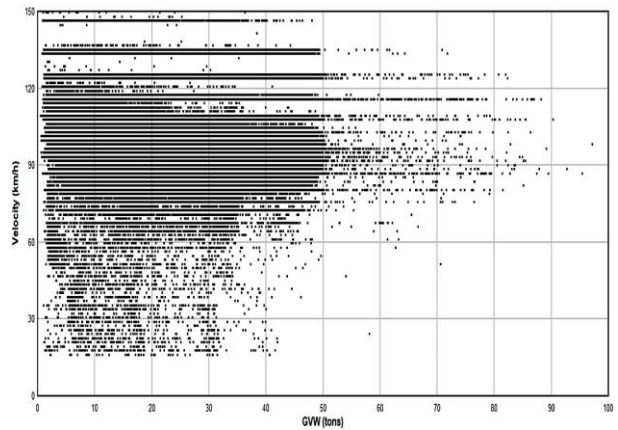
$$T_{2L} = (D_i + L_{Bi}) / V_{2j} + \Delta t_j \quad (11)$$

The arrival and departure times on the bridge for each truck in the main lane and passing lane were compared with each other and the total number of side-by-side events were calculated as explained above. Schematic representation of the Monte Carlo simulation for side-by-side trucks is presented in Figure 2.



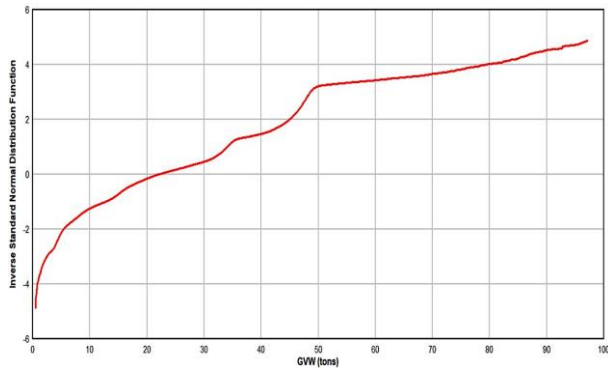
**Figure 2.** Schematic representation of side-by-side Monte Carlo simulations.

For Woodburn NB all year WIM data, the statistical information (the GVW and the velocity of the trucks) is shown in Figure 3. As it can be indicated from Figure 3 that, the GVW's of these trucks range from almost 1 ton to 100 tons (2 kips to 220 kips). In addition, the velocities of the corresponding trucks range from, 16 km/h to 150 km/h (10 mph to 95 mph). Moreover, the inverse standard normal distribution of all year truck data with respect to GVW is shown in Figure 4. As it can be indicated from Figure 4 that, for the trucks with GVW ranging from 1 ton to 100 tons the inverse standard normal distribution function values range from  $-4.87$  to  $4.87$ . Cumulative distribution function (CDF) of the truck data with respect to the time separation values of the side-by-side trucks is presented in Figure 5. CDF values start from 0.48. Time separation between the side-by-side trucks ranges from 1 to 100,000 seconds. CDF is normally distributed.

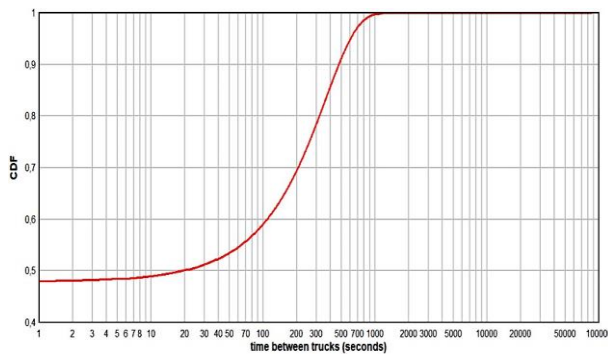


**Figure 3.** Statistical data of Woodburn NB all year data 1,787,612 trucks.





**Figure 4.** Inverse Standard Normal Distribution of GVW on all year data.



**Figure 5.** Cumulative Distribution function of the Truck Data.

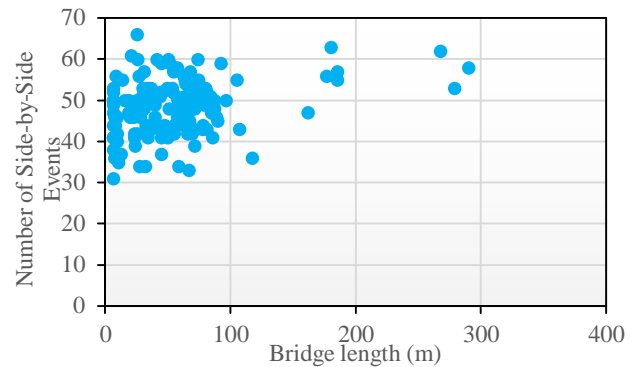
After performing the simulations and obtaining the side-by-side events, the degrees of correlation between the side-by-side trucks for each bridge were calculated. The GVW of the main lane and passing lane trucks for each side-by-side event identified on a bridge during the Monte Carlo simulations were used to obtain the degree of correlation between the trucks. The correlation coefficient ( $\rho$ ) equation between two random variables  $X$  and  $Y$  with expected values  $\mu_x$  and  $\mu_y$  and standard deviations  $\sigma_x$  and  $\sigma_y$  are given as:

$$r = \frac{E[(X - m_x)(Y - m_y)]}{S_x S_y} \quad (12)$$

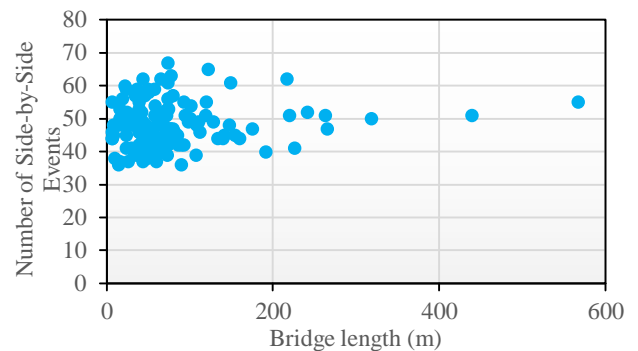
where  $E$  is the expected value operator.

Matlab and Microsoft Excel spreadsheets were used to obtain correlation coefficients for each bridge and side-by-side loading event. The side-by-side event numbers vs. the bridge lengths are given in Figure 6 for the half of the bridges. Total number of the bridges in Figure 6 is 145. The same results for the other half are shown in Figure 7. Each marker in Figures 6 to 9 represents a single bridge on I-5 southbound. Bridge span lengths range from 1.22 m (4 ft) to 567 m (173 ft). As seen in Figure 6, the bridge span lengths did not strongly influence on number of side-by-side events. It can be indicated from Figure 6 and 7 that side-by-side event numbers range from 30 to 67. The majority of the bridges have a span length ranging between 50 to 100 m. The side-by-side probabilities vs. the degree of correlation for the corresponding half of the bridges are given in Figure 8. The side-by-side probabilities of the other half of the bridges are shown in Fig. 9. As given in Figures 8 and 9, the degree of correlation ranged from 0.40 to -0.54 for

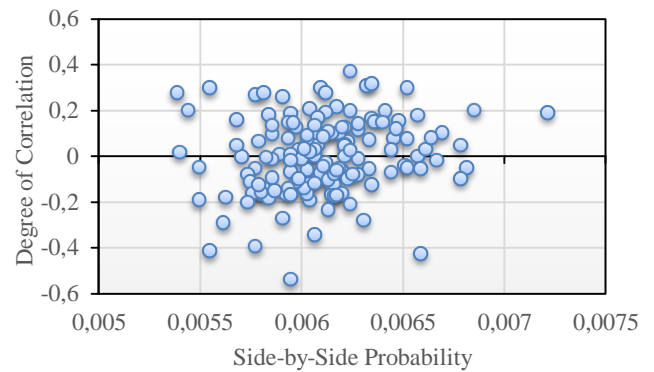
the different bridges and the side-by-side probability (Ps/s) range from 0.005 to 0.0075.



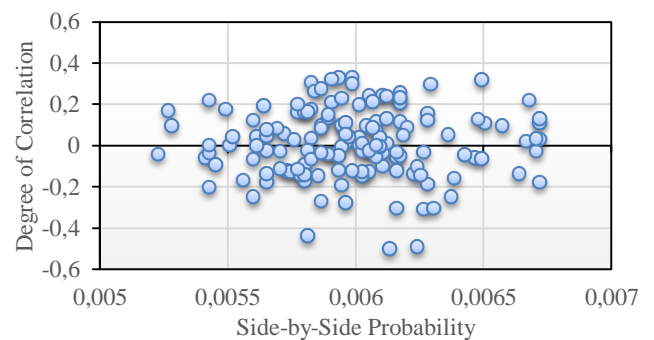
**Figure 6.** Side-by-side event numbers for bridges on I-5 - half of the 290 bridges.



**Figure 7.** Side-by-side event numbers for bridges on I-5 - half of the 290 bridges.



**Figure 8.** Degree of correlation vs side-by-side probability- half of the 290 bridges (each point represents a bridge on I5 southbound).



**Figure 9.** Degree of correlation vs side-by-side probability- other half of the 290 bridges.

A histogram of the correlation coefficients is shown in Figure 10 for all the bridges. In Figure 10 on average, the degree of correlation is near zero and appears to be normally distributed. The observed largest side-by-side probability was 0.0075. This value was smaller than the 1/15 value given by [18], for an ADTT of 5,000. And the degree of correlation at worst was less than 0.5. It was reported in [22] that, side-by-side probabilities ( $P_{S/S}$ ) are, 0.008, 0.0016 and 0.0001578 for ADTTs of 5,000, 1,000 and 100, respectively.

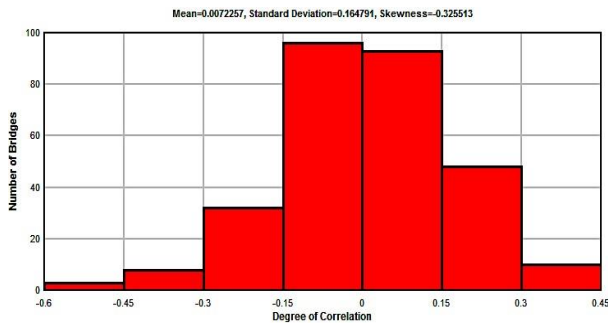


Figure 10. Histogram for degree of correlation from Monte Carlo simulations.

### 3. LANE LOAD STATISTICS

In this section lane load parameters are generated considering the Monte Carlo simulations defined above. Three degrees of correlation between the trucks loads in two adjacent lanes was considered in [18]. These correlations were; no correlation ( $\rho=0$ ), partial correlation ( $\rho=0.5$ ) and full correlation ( $\rho=1$ ). Assumptions given in [18] were the following; every 15<sup>th</sup> truck is on the bridge is simultaneously with another truck (side-by-side). It was assumed in [22] that, for each simultaneous occurrence every 10<sup>th</sup> time the two trucks are partially correlated and every 30<sup>th</sup> time the two trucks are fully correlated with regard to weight. To be conservative in the two lane-loaded moment and shear calculations, the degrees of correlation defined in [22] were implemented in this study. The lane load parameters that were obtained for two lane bridges in this paper correspond to ADTT=5,000 (truck traffic in two lanes in one direction). Lane load parameters for Woodburn NB are presented in Table 2. The total number of occurrences, N, expected in the time period, T, is determined as:

$$N = T (\text{ADTT}) (365) \tag{13}$$

here, T is the time period (5 years) and ADTT is 5,000 for Woodburn NB site. The number of events for lane 1 ( $L_1$ ) with  $\rho=0$ , is expressed as:

$$N_{r=0} = N P_{S/S} \tag{14}$$

where  $P_{S/S}$  is the side-by-side probability 1/15. The number of events for lane 1 ( $L_1$ ) with  $\rho=0.5$  is calculated as:

$$N_{r=0.5} = N P_{S/S} (1/10) \tag{15}$$

in which 1/10 value comes from every 10<sup>th</sup> time trucks are partially correlated. For the fully correlated case the number of events in lane 1 can be written as:

$$N_{r=1} = N P_{S/S} (1/30) \tag{16}$$

in which 1/30 corresponds to every 30<sup>th</sup> time trucks on both lanes are fully correlated (both heavy trucks). The parameters for lane 2 are calculated such that when no correlation exists between the trucks the truck in lane 2 corresponds to the average truck. For the partially correlated case  $\rho=0.5$ , N in lane 2 can be determined as:

$$N_{r=0.5,L_2} = N_{r=0.5} P_{S/S} (1/10) \tag{17}$$

For fully correlated case  $\rho=1$ , N in lane 2 can be written as:

$$N_{r=1,L_2} = N_{r=1} \tag{18}$$

From the number of events, the z score can be determined for each of the lanes as:

$$z = -F^{-1}(1/N) \tag{19}$$

Where a z-score is the number of standard deviations from the mean of a data point.

Table 2. Lane Load Parameters for Two Lane Traffic Woodburn (ADTT=5,000).

Number of Lanes Loaded		N	z	T
One		9,125,000	5.18	5 Years
Two	$\rho=0$ $L_1$	608,333	4.65	4 Months
	$L_2$	1	0	Average
Two	$\rho=0.5$ $L_1$	60,833	4.15	12 Days
	$L_2$	405	2.81	1 day
Two	$\rho=1$ $L_1$	20,277	3.89	4 Days
	$L_2$	20,277	3.89	4 Days

(13)

In the study of [23] higher side-by-side probabilities that vary with ADTT (1/15, 1/100 and 1/1,000) were used, in this paper a side-by-side probability of 1/30 was used for all different ADTT levels. In [23],  $Np*P_{S/S}$  was considered as the number of events. However the paper used just  $Np$  as the number of events. With these new modifications the conclusions obtained from this study is given below.

#### 4. CONCLUSION

In this study the side-by-side loading probabilities were found to be smaller than the ones that had been defined in the literature. These probabilities were also smaller than the ones presented in American Association of State Highway and Transportation Officials LRFD manuals. Degree-of-correlation of the side-by-side events were found to be normally distributed. The absolute maximum value of the degree of correlation was calculated as 0.54 that correspond to a side-by-side probability of 0.006. The smallest side-by-side probability was obtained as 0.0052. Maximum side-by-side event number on the corresponding bridges was found as 67. Highest z score was obtained for the one lane loaded case with 5 year time period and the lowest z score was found in two lane loaded case with a time period of one day. It was also found that, the bridge span lengths that ranged from 1.22 m to 567 m did not have a strong influence on the number of side-by-side events.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Oregon Department of Transportation. Any opinions and conclusions are those of the authors and do not necessarily reflect the views of the supporter.

#### REFERENCES

- [1] Moses, F. "Calibration of Load Factors for LRFR Bridge Evaluation.", NCHRP Report 454, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C (2000).
- [2] AASHTO. "The Manual for Bridge Evaluation First Edition", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C, (2008).
- [3] AASHTO. "LRFD Bridge Design Specifications. Customary U.S. Units.", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C, (2012).
- [4] AASHTO. "Manual for Condition Evaluation and Load and Resistance Factor Rating (LRFR) of Highway Bridges.", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C, (2003).
- [5] Pelphrey, J., Higgins, C., Sivakumar, B., Groff, R.L., Hartman, B.H., Charbonneau, J.P., Rooper, J.W. and Johnson B.V. "State-Specific LRFR Live Load Factors Using Weigh-in-Motion Data.", *Journal of Bridge Engineering-ASCE*, 13: 339-350, (2008).
- [6] Zhou, J., Shi, X., Caprani, C.C. and Ruana, X. "Multi-lane factor for bridge traffic load from extreme events of coincident lane load effects.", *Structural Safety*, 72:17-29, (2018).
- [7] Yang, X.Y., Gong, J.X., Xu, B.H. and Zhu, J.C. "Evaluation of multi-lane transverse reduction factor under random vehicle load.", *Computers and Concrete*, 19(6): 725-736, (2017).
- [8] Yanik, A., Higgins, C. and Borello, D. "Development of live load factors for rating of Oregon bridges using WIM load effects and statistical bridge models.", Technical Report for Oregon Department of Transportation, (2015).
- [9] Millam, J. and Zhongguo, Ma. "Single-lane live load distribution factor for decked precast, prestressed concrete girder bridges.", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1928:142-152, (2005).
- [10] Enright, B. and O'Brien, E.J. "Monte Carlo simulation of extreme traffic loading on short and medium span bridges." *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(12):1267-1282, (2013).
- [11] Sgambi, L., Garavaglia, E., Basso, N. and Bontempi, F. "Monte Carlo simulation for seismic analysis of a long span suspension bridge." *Engineering Structures*, 78:100-111, (2014).
- [12] Abu Dabous, S. and Al-Khayyat, G. "A Flexible Bridge Rating Method Based on Analytical Evidential Reasoning and Monte Carlo Simulation." *Advances in Civil Engineering*, (2018), Article ID 1290632, 13 pages, (2018).
- [13] Haciefendioglu, K., Basaga and H.B., Banerjee, S. "Probabilistic analysis of historic masonry bridges to random ground motion by Monte Carlo Simulation using Response Surface Method." *Construction and Building Materials*, 134: 199-209, (2017).
- [14] Ole, O., Ronnquist, A., Naess, A. and Sigbjornsson, R. Estimation of extreme response of floating bridges by Monte Carlo simulation. *EURODYN-2014: IX International Conference on Structural Dynamics, Porto-Portugal*, 2905-2912, (2014).
- [15] Akgul, F. and Frangopol, D.M. "Probabilistic analysis of bridge networks based on system reliability and Monte Carlo simulation." In: Der Kiureghian, A., Madanat, S., Pestana, J.M. (eds.) *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, Millpress, Rotterdam, 1633-1637, (2003).
- [16] Tekin, H., Manici, T. and Singh, V. "An Investigation on Shielding Effect of Bismuth on Lung Ct Scan Using Monte Carlo Simulation." *Politeknik Dergisi*, 19: 617-622, (2016).
- [17] Yiğit, A. and Gedikli, A. "Türkiye Kuvvetli Yer Hareketi Kayıtları Kullanılarak Deprem Kaynaklı Kalıcı Zemin Yer Değiştirmelerinin Tahmin Edilmesi." *Politeknik Dergisi*, 18(3), 175-181, (2015).
- [18] Sivakumar, B., Moses, F., Fu, G. and Ghosn, M. "Legal Truck Loads and AASHTO Legal Loads for Posting" *NCHRP Report 575, Transportation Research Board, National Research Council*, Washington, D.C, (2007).
- [19] Öncü Davas S. and Alhan C. "Reliability of semi-active seismic isolation under near-fault earthquakes", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 114: 146-164, (2019).
- [20] Haldar, A. and Mahadevan, S. "Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design." John Wiley & Sons, (2000).
- [21] Öncü-Davas, S. "Probabilistic Behavior of Buildings with Semi-active Seismic Isolation Systems under Earthquake Loads.", *PhD Dissertation*, Istanbul University, (2018).
- [22] Nowak, A.S. "Calibration of LRFD Bridge Design Code." *NCHRP Report 368, Transportation Research Board, National Research Council*, Washington, D.C., (1999).
- [23] Moses, F. "Calibration of Load Factors for LRFR Bridge Evaluation." *NCHRP Report 454, Transportation Research Board, National Research Council*, Washington, D.C. (2001).

**APPENDIX****Table A-1** Bridges on I-5 Southbound (Lengths are given in feet)

Highway	MP	Bridge Name	Length
1	282.8	Champoeg Creek, Park Rd (Park Br)	220
1	4.61	Hwy 1 over Hwy 1 Frontage Road	136
1	5.36	Hwy 1 SB over Hwy 273	234
1	10.34	Hwy 1 over Neil Creek Rd	75
1	11.93	CORP over Hwy 1 (Mistletoe)	146
1	13.2	Hwy 1 SB over Crowson Rd	150
1	14.77	E Main St over Hwy 1	385
1	14.96	Bear Creek, Hwy 1 SB at MP 14.96	200
1	16.7	Mountain Ave over Hwy 1	259
1	17.29	Hwy 1 SB over Eagle Mill Rd	227
1	18.56	Butler Creek Rd over Hwy 1	277
1	21.92	Suncrest Rd over Hwy 1	275
1	22.42	Bear Creek, Hwy 1 SB at MP 22.42	285
1	23.07	Bear Creek, Hwy 1 SB at MP 23.07	285
1	27.09	Bear Creek, Hwy 1 SB at MP 27.09	315
1	27.2	Monotube Sign Cantilever Hwy 001 at MP 27.20	33
1	28.66	Medford Viaduct, Hwy 1	878
1	29.64	Hwy 1 over McAndrews Rd	164
1	30.69	Bear Creek, Hwy 1 SB at MP 30.69	206
1	33.85	Upton Rd over Hwy 1	218
1	34.28	Griffin Creek, Hwy 1	24
1	35.24	Jackson Creek, Hwy 1	30
1	36.09	Hwy 1 SB over CORP (Seven Oaks)	344
1	36.64	Tolo Road over Hwy 1	184
1	38.73	Hwy 1 over Foley Lane Frontage Rd	83
1	43.08	Hwy 1 over Galls Creek Front Rd Conn	31



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Optimising high lime fly ash content by means of silica fume incorporation to control alkali-silica reaction and drying shrinkage of mortars

## *Harçların alkali-silis reaksiyonu ve kuruma büzülmesini kontrol etmek için silis dumanı ikamesi ile yüksek kirece sahip uçucu külün içeriğinin optimizasyonu*

*Yazar(lar) (Author(s)):* H. Süleyman GÖKÇE<sup>1</sup>, Hojjat HOSSEINNEZHAD<sup>2</sup>, Onur ÜZÜM<sup>3</sup>, Daniel HATUNGİMANA<sup>4</sup>, Kambiz RAMYAR<sup>5</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-6978-0135

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-9846-2435

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-4448-4302

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0001-7564-0756

ORCID<sup>5</sup>: 0000-0003-2200-2691

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Gökçe H.S., Hosseinneshad H., Üzüm O., Hatungimana D. and Ramyar K., “Optimising high lime fly ash content by means of silica fume incorporation to control alkali-silica reaction and drying shrinkage of mortars”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 61-66, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.444036

# Optimising High Lime Fly Ash Content By Means of Silica Fume Incorporation to Control Alkali-Silica Reaction And Drying Shrinkage of Mortars

*Araştırma Makalesi / Research Article*

H. Süleyman GÖKÇE<sup>1\*</sup>, Hojjat HOSSEINNEZHAD<sup>2</sup>, Onur ÜZÜM<sup>2</sup>, Daniel HATUNGIMANA<sup>2</sup>, Kambiz RAMYAR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Bayburt Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Ege Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 15.07.2018 ; Kabul/Accepted : 19.02.2019)

## ABSTRACT

In this study, the effect of binary and ternary cementitious systems composed of portland cement, high-lime fly ash and silica fume on the compressive strength, alkali-silica reaction (ASTM C 1567) and drying shrinkage of mortar mixtures was researched. For this purpose, binary and ternary binders were prepared with partial replacement of cement with either fly ash (15wt% and 30wt%) or silica fume (5wt%) or both mineral admixtures (15wt%+5wt% and 30wt%+5wt%). An alkali reactive basalt aggregate was used in this study. It was found that partial replacement of cement with high-lime fly ash reduced the strength of mortar mixtures even up to 28-days. Besides, addition of 5% silica fume had not a significant effect on the early strength of fly ash-bearing mixtures. However, silica fume inclusion improved the 28-day strength of mixtures. In terms of alkali-silica reaction (ASR), the fly ash with lower lime content reduced the 14-day expansion more than that of fly ash with higher lime content. The opposite results were the case in 28-day ASR expansions. The ASR expansions of the fly ash-bearing mixtures were significantly reduced by the introduction of the additional 5% silica fume to these mixtures. However, silica fume incorporation remarkably increased the drying shrinkage values of the mixtures. Finally, fly ash with higher lime content was found to be more satisfactory in terms of compressive strength, alkali-silica reaction and drying shrinkage in the ternary binder system.

**Keywords:** Mortar, lime content of fly ash, silica fume, compressive strength, alkali-silica reaction, drying shrinkage.

## Harçların Alkali-Silis Reaksiyonu ve Kuruma Büzülmesini Kontrol Etmek için Silis Dumanı İkamesi ile Yüksek Kirece Sahip Uçucu Külün İçeriğinin Optimizasyonu

### ÖZ

Bu çalışmada, portlant çimentosu, yüksek kireçli uçucu kül ve silis dumanından oluşan ikili ve üçlü çimentolu sistemlerin harç karışımlarının basınç dayanımı, alkali-silis reaksiyonu (ASR) ve kuruma büzülmesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, ikili ve üçlü bağlayıcılar uçucu kül (%15 ve %30) veya silis dumanı (%5) veya her ikisinin birlikte (%15+%5) çimento ile ağırlıkça kısmi ikamesiyle hazırlanmıştır. Çalışmada, reaktif bir bazalt agregası kullanılmıştır. Sonuç olarak, çimentonun yüksek kireçli uçucu küllerle kısmen ikamesi harçların dayanımını 28 güne kadar bile düşürmektedir. Ayrıca %5 silis dumanı ikamesinin uçucu küllü karışımların erken yaş dayanımlarına önemli bir etkisi yoktur. Ancak silis dumanı kullanımı karışımların 28 günlük dayanımlarını iyileştirmiştir. ASR bakımından göreceli olarak düşük kireç içerikli uçucu kül, 14 günlük genleşmeleri yüksek kireç içerikli uçucu külden daha fazla azaltmıştır. 28 günlük genleşmelerde ise zıt bir sonuç elde edilmiştir. Uçucu kül içeren karışımların ASR genleşmeleri %5 oranında silis dumanı ikamesinde önemli oranda azalmıştır. Ancak silis dumanının ikamesi karışımların kuruma büzülmesini kayda değer oranda artırmıştır. Nihai olarak, daha yüksek kireç içeriğine sahip uçucu kül ve az miktarda silis dumanı içeren karışımlarının basınç dayanımı, alkali-silis reaksiyonu ve kuruma büzülmesi açısından daha iyi sonuçlar göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Harç, uçucu külün kireç içeriği, silis dumanı, basınç dayanımı, alkali-silis reaksiyonu, kuruma büzülmesi.

### 1. INTRODUCTION

Utilization of the cementitious wastes such as fly ash has been an essential topic for the sustainability of cement

and concrete industry in addition to its benefits on physical, mechanical and chemical properties of the cementitious systems. However, high lime fly ashes are generally less effective in controlling alkali-silica reaction (ASR) expansion, thus, it becomes necessary to increase its replacement level even up to 60% to control

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : [suleymangokce@bayburt.edu.tr](mailto:suleymangokce@bayburt.edu.tr)

the ASR expansion [1]. Researchers emphasize some drawbacks of the high volume fly ash cementitious systems such as insufficient early strength due to poor reaction rate [2-5]. Moreover, drying shrinkage of the concrete containing mineral admixture may be higher than that of the plain concrete due to higher paste volume and presence of higher amount of smaller capillary pores in the matrix [6]. Therefore, in practice optimising the inclusion level of the mineral admixture in the binder to meet all of the requirements including strength, volume stability and durability is challenging.

Some physical, mechanical and durability properties of the cementitious systems can be improved by using ternary systems containing silica fume [7-10]. However, owing to its less availability, the use of silica fume increases the cost of the binder compared to that of the ordinary portland cement [11]. Thomas et al. [1] reported that high lime fly ash requirement to suppress ASR expansion can be significantly reduced by the addition of a small amount of silica fume to the mixture.

In this study, the performance of binary and ternary cementitious systems containing high lime fly ashes (having different lime contents) and small amount of silica fume was researched from compressive strength, alkali-silica reactivity and drying shrinkage of mortar mixtures viewpoints.

## 2. MATERIAL AND METHOD

### 2.1. Materials

In this study, an ordinary portland cement (CEM I 42.5R) was used. Two types of fly ashes having 15.94% and 39.45% lime contents were supplied from Çayırhan and Soma Power Plants (Turkey), respectively. According to Thomas et al. [12], the Çayırhan and Soma fly ashes can be classified as intermediate calcium fly ash (IFA) and high calcium fly ash (HFA), respectively. Silica fume (SF) was supplied from Antalya Etibank Ferrochrome Plant (Turkey). Basalt aggregate with maximum size of 4.75 mm was used in preparation of the mortar mixtures. A polycarboxylate ether-based superplasticizer (SP) was used in some of the mixtures to improve their flow to the desired value ( $16 \pm 1$  cm). Some properties of the cement, fly ashes and silica fume are presented in Table 1.

### 2.2. Mix Proportions

Table 2 shows the proportions of mortar mixtures used in the compressive strength and drying shrinkage test specimens. The samples are designated by their mineral admixture type and replacement level. For example, I15/S5 indicates a mixture containing 15wt% intermediate calcium fly ash and 5wt% silica fume.

Moreover, the mix proportions prescribed in ASTM C1567 [13] for the ASR test specimens are given in Table 3.

**Table 1.** Some properties of cementitious materials

Item %	Portland cement	IFA	HFA	Silica Fume
SiO <sub>2</sub>	18.40	47.07	32.80	78.82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.51	11.56	13.77	0.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.16	7.22	4.78	0.98
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	65.85	51.35	79.80
CaO	63.9	15.94	39.45	2.35
MgO	1.6	7.77	2.05	6.41
SO <sub>3</sub>	3.62	2.78	4.22	1.00
Na <sub>2</sub> O	0.46	1.59	0.4	-
K <sub>2</sub> O	0.75	3.04	1.18	3.69
Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	0.95	3.59	1.18	2.42
Loss on ignition	3.2	0.42	0.72	3.01
Blaine fineness, cm <sup>2</sup> /g	3630	-	2992	200000
Specific gravity	3.10	2.55	2.42	2.37

**Table 2.** Mix proportions of compressive strength and drying shrinkage test specimens

Mixtures	Cement (g)	IFA (g)	HFA (g)	Silica Fume (g)	Water (g)	SP (%*)	Fine aggregate (g)	Flow, cm
Ref	500	0	0	0	317	0	1375	16
S5	475	0	0	25	317	0	1375	16
I15	425	75	0	0	317	0	1375	16
I15/S5	400	75	0	25	317	0	1375	15.5
I30	350	150	0	0	317	0.2	1375	16
I30/S5	325	150	0	25	317	0.2	1375	15.5
H15	425	0	75	0	317	0	1375	15.5
H15/S5	400	0	75	25	317	0	1375	15.5
H30	350	0	150	0	317	0.2	1375	17
H30/S5	325	0	150	25	317	0.2	1375	16.5

\* Percent by weight of cementitious material

### 2.3. Methods

Mortar mixtures were placed into the 50 mm-cube molds for determination of compressive strength, and into the 25×25×285 mm- prism molds for determination of alkali-silica reactivity and drying shrinkage. The molded specimens were kept at 23±2°C and at least 90% relative humidity for first 24 hours. After demolding, the cube specimens were kept in water at 20±2°C for further 2, 6 and 27 days for compressive strength. Alkali-silica reaction test was performed in accordance with the ASTM C 1567 [13] (accelerated mortar bar method). For drying shrinkage test, mortar bar specimens were cured in water at 20±2°C up to 28 days, and then exposed to drying at 23±2°C and 55-65% relative humidity up to 28 days. The gage length of the specimens was considered as 250 mm.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. Compressive Strength Test Results

The actual and relative compressive strength results of

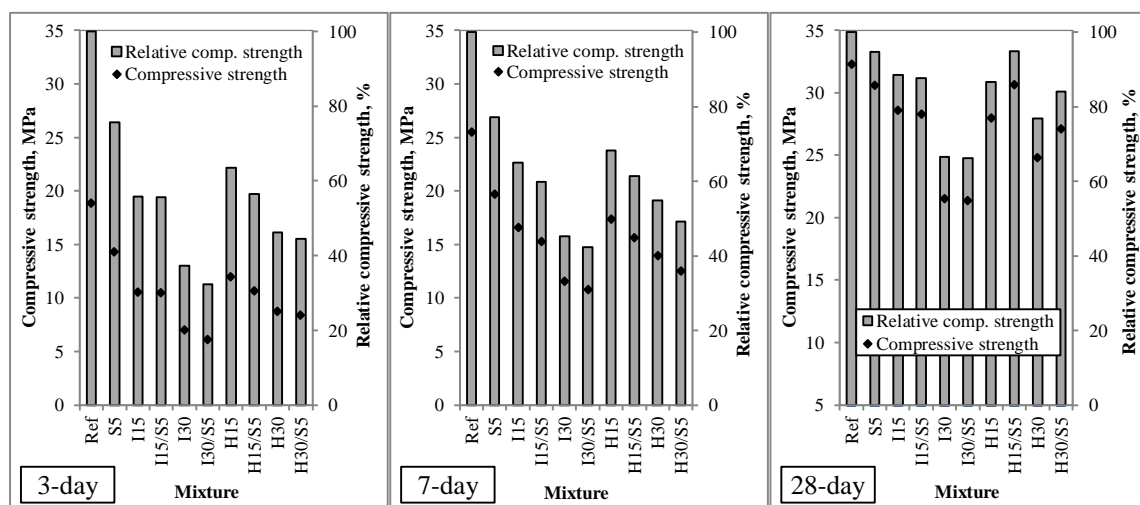
compressive strength of the mortars according to reference mixture up to 68% and 58% for 3 days and 7 days, respectively. The reductions were found more remarkable in the mixtures containing IFA compared to those containing HFA. Prolonging the curing time reduced the difference between the strength of mineral admixture-bearing mixtures and the control mixture. However, the strength of binary and ternary mixtures was found to be lower (up to 34%) than that of the control mixture even at 28 days. Silica fume incorporation improved the 28-day compressive strength of the mixtures containing HFA.

The presence of large amount of lime affects both the nature of the glassy and crystalline phases of the fly ash. The amorphous phase in high-lime fly ash may be simply described as calcium-alumino-silicate glass [14], although different glass types may probably coexist over wide range of compositions [15-17]. The presence of lime in fly ash affects its reactivity. Calcium substitution in the glassy phase of the fly ash is generally considered to increase the reactivity of its glassy phase. Thus, in

**Table 3.** Mix proportions for ASR as prescribed in ASTM C1567 (water/binder ratio: 0.47, sand/cement ratio: 2.25)

Mixtures	Cement (g)	IFA (g)	HFA (g)	Silica Fume (g)	Water (g)	SP (%*)	Sand (g)
Ref	444	0	0	0	209	0	1000
S5	422	0	0	22	209	0	1000
I15	377	67	0	0	209	0	1000
I15/S5	355	67	0	22	209	0	1000
I30	311	133	0	0	209	0.2	1000
I30/S5	289	133	0	22	209	0.2	1000
H15	377	0	67	0	209	0	1000
H15/S5	355	0	67	22	209	0	1000
H30	311	0	133	0	209	0.2	1000
H30/S5	289	0	133	22	209	0.2	1000

\* Percent by weight of cementitious material



**Figure 1.** Compressive strength of mortar mixtures

the mortars are given in Figure 1 for 3, 7 and 28-day curing times, respectively. Introduction of the fly ash and silica fume significantly reduced the early age

high-lime fly ashes, the presence of lime causes the formation of calcium-silicate or calcium-aluminate hydrates in the absence of an additional source of lime.



The self-cementitious behaviour of high-lime ashes is attributed to the hydration and reaction of lime-bearing crystalline phases [12]. Mehta [18] stated that calcium content and particle size distribution of fly ash are the most important parameters governing the strength development in normally cured portland cement mixtures containing fly ash. Thomas et al. [12] reported that the introduction of high lime fly ash results in higher compressive strength values than that of low lime fly ash at curing ages up to 28 days.

**3.2. ASR Test Results**

ASR expansions of mortar bars are shown in Figure 2. Although, 14 days soaking period in NaOH solution is prescribed in the standard, the duration of the test was extended to 56 days in the present study. The basalt aggregate, showing 0.747% 14-day expansion, was found to be significantly reactive in terms of ASR. However, as it was expected, the expansions significantly

decreased by the use of mineral admixtures, in spite of higher  $Na_2O_{eq}$  contents of the mineral admixtures than that of the portland cement.

Figure 3 shows the relative 14-day and 28-day expansion of mortar bars compared to that of the control mixture containing no mineral admixture. The IFA mixtures showed somewhat lower 14-day ASR expansion values than those of HFA mixtures. The expansion of mix I30/S5 was found lower by 95% according to reference mix. However, beyond 14 days the opposite results were observed, i.e., HFA bearing mixtures showed slightly lower expansions than those of IFA containing mixtures. Further, addition of 5% silica fume to the mixtures significantly reduced the ASR expansions. The 28-day expansion of mix H30/S5 was found lower by 88% according to reference mix. Thomas et al. [12] reported that the efficiency of high lime fly ash in controlling ASR expansions is reduced in concrete specimens cured over

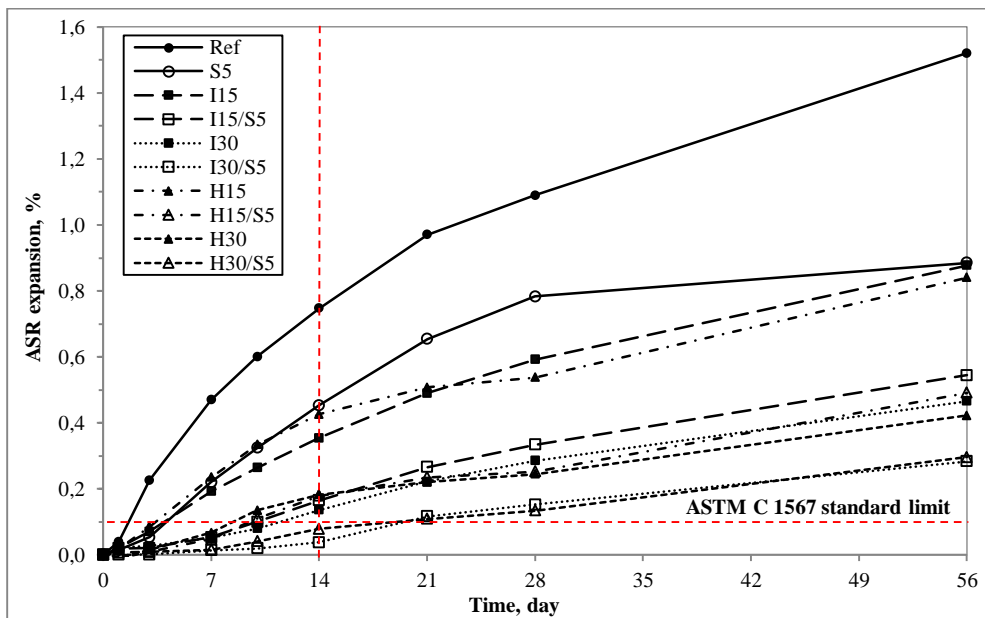


Figure 2. ASR expansions of mortar bars

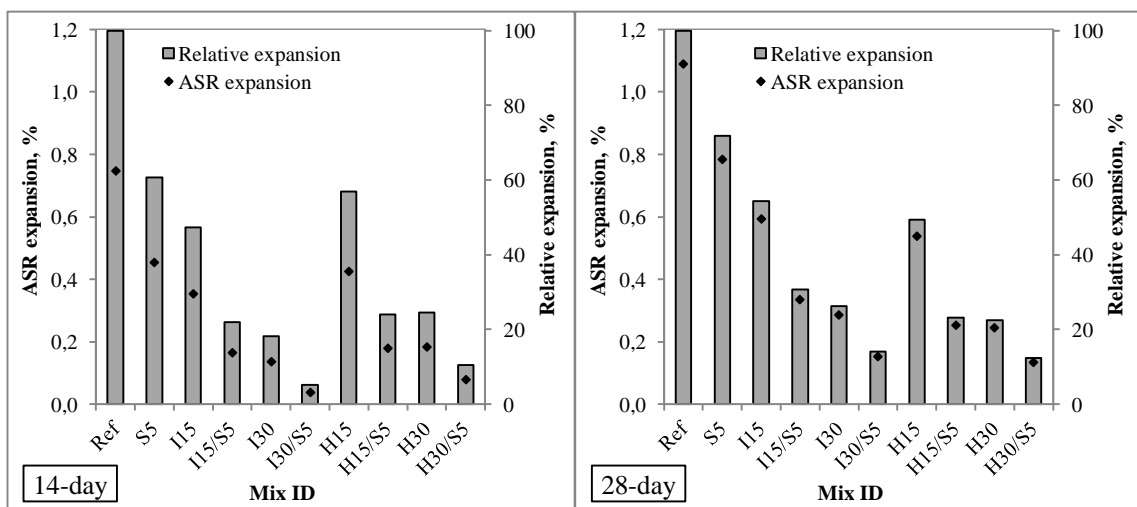


Figure 3. 14-day and 28-day ASR expansions of mortar bars

water at 38 °C for 24 months. Shehata and Thomas [19] similarly reported that 5% silica fume incorporation significantly reduced the fly ash substitution level required for satisfactory expansions caused by ASR. The supplementary cementitious materials that are low in alkali and calcium, and high in silica tend to be the most effective in reducing alkalinity of the pore solution and these materials can be used at relatively lower replacement levels to eliminate damaging ASR expansion [20]. On the other hand, effect of the supplementary cementitious materials on the formation and expansion of ASR gel is reported to be more complex than the limited above mentioned assessments [21].

### 3.3. Drying Shrinkage Test Results

Drying shrinkage-time relationship and 28-day shrinkage values as well as the relative 28-day shrinkage of the mixtures (compared to that of the control mixture) are presented in Figure 4. As it can be seen from the figure, silica fume remarkably increased (up to 23% according to reference mixture) the shrinkage values of the mortars containing IFA. Nath and Sarker [22] reported that type F fly ash with 2% CaO can increase the 28-day drying shrinkage of concrete with a constant w/b ratio and a constant binder content. The drying shrinkage results can be affected by strength variation, paste volume and amount of small capillary pores in the matrix [6,22].

days. The effect was more pronounced in the mixtures containing fly ash with lower lime content.

- Addition of 5% silica fume had not a significant effect on the early strength of fly ash-bearing mixtures, even it caused a further reduction in the strength. However, silica fume inclusion improved the 28-day strength of mixtures containing fly ash having higher lime content.

- The fly ash with lower lime content reduced the 14-day ASR expansion more than that of fly ash with higher lime content. The opposite results were the case in 28-day ASR expansions. The ASR expansions of the fly ash-bearing mixtures were significantly reduced by the introduction of the 5% silica fume.

- Drying shrinkage of the mortars containing fly ash having lower lime content was adversely affected by the addition of silica fume. However, the presence of silica fume in the mixtures containing high lime fly ash had not a significant effect on the drying shrinkage.

- Further study seems to be necessary on the optimization of fly ash and silica fume contents in ternary cementitious systems in terms of lime content of fly ash to maximize compressive strength and minimize ASR expansion as well as drying shrinkage of the cementitious systems.

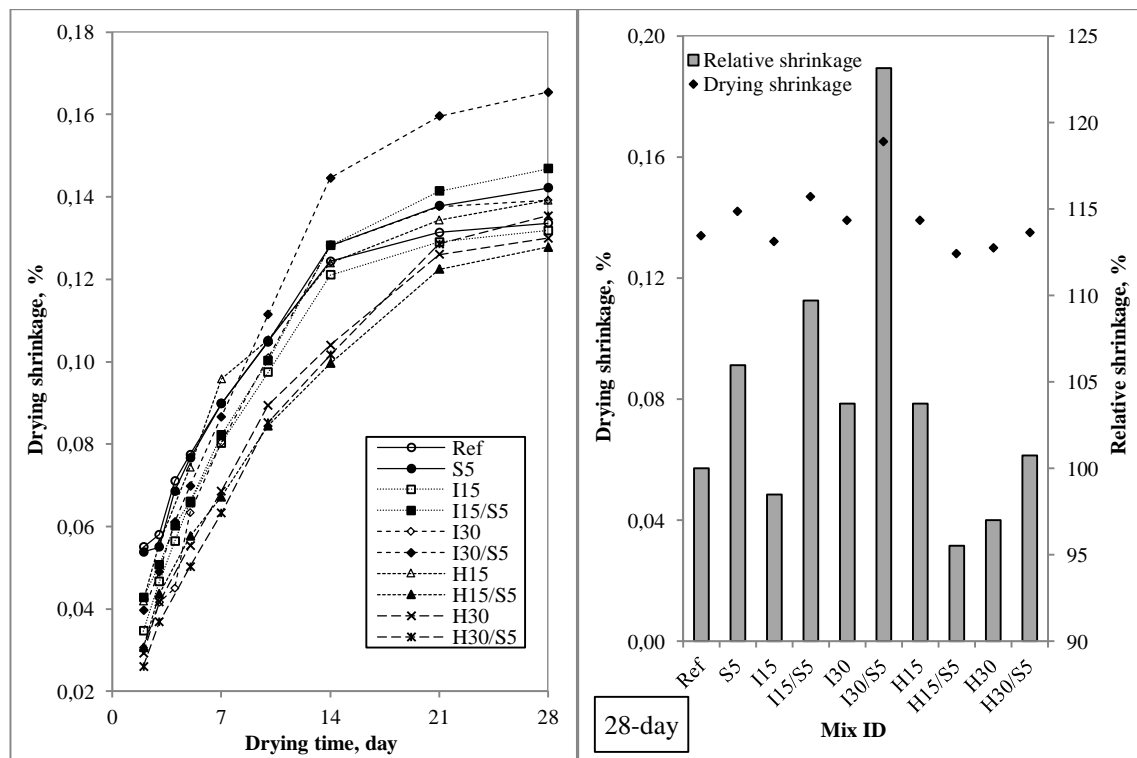


Figure 4. Drying shrinkage values of mortar specimens

### 3. CONCLUSION

The following results can be drawn for the materials used and tests applied in this study:

- Partial replacement of cement with high-lime fly ash reduced the strength of mortar mixtures even up to 28-

### REFERENCES

- [1] Thomas M.D.A., Shehata M.H., Shashiprakash S.G., Hopkins D.S. and Cail K., "Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete", *Cement and Concrete Research*, 29: 1207-1214, (1999).

- [2] Lam L., Wong Y.L. and Poon C.S., “Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems”, *Cement and Concrete Research*, 30: 747-756, (2000).
- [3] Zhang Y.M., Sun W. and Yan H.D., “Hydration of high-volume fly ash cement pastes”, *Cement and Concrete Composites*, 22: 445-452, (2000).
- [4] Yazıcı H., Aydın S., Yiğiter H. and Baradan B., “Effect of steam curing on class C high-volume fly ash concrete mixtures”, *Cement and Concrete Research*, 35: 1122-1127, (2005).
- [5] Hemalatha T. and Sasmal S., “Early-age strength development in fly ash blended cement composites: Investigation through chemical activation”, *Magazine of Concrete Research*, (Ahead of Print), (2018).
- [6] Mehta P.K. and Monteiro P.J.M., “Concrete: Microstructure, properties, and materials”, Third edition, *McGraw-Hill*, (2006).
- [7] Malhotra V.M. and Carrette G.G., “Silica fume concrete-properties, applications and limitations”, *Concrete International: Design and Construction*, 5: 40-46, (1983).
- [8] Bickely J.A., Ryell J., Rogers C. and Hooton R.D., “Some characteristic of high strength concrete”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18: 885-889, (1991).
- [9] Temiz H. ve Yeğınobalı A., “Uçucu kül ve silis dumanı katkılı çimento hamur ve harçlarının bazı özellikleri”, *Endüstriyel Ankların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, İMO, Ankara, 213-226, (1995).
- [10] Bagheri A.R., Zanganeh H. and Moalemi M.M., “Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag”, *Cement and Concrete Composites*, 34: 663-670, (2012).
- [11] Khayat K.H. and Aitcin P.C. “Silica fume in concrete: an overview”, *ACI SP-132*, Detroit, 835-865, (1992).
- [12] Thomas M.D.A., Shehata M.H. and Shashiprakash S.G., “The use of fly ash in concrete: classification by composition”, *Cement, Concrete, and Aggregates*, 21: 105-110, (1999).
- [13] ASTM C 1567, “Standard test method for determining the potential alkali-silica reactivity of combinations of cementitious materials and aggregate (Accelerated mortar-bar method)”, ASTM, USA, (2013).
- [14] ACI Committee 232, “Use of Fly Ash in Concrete”, ACI, Detroit, (1996).
- [15] Roy D.M., Luke K. and Diamond S., “Characterization of fly ash and its reactions in concrete”, *MRS Symposium Proceedings*, Materials Research Society, Pittsburgh, 43: 3-20, (1985).
- [16] Hemmings R.T. and Berry E.E., “On the Glass in Coal Fly Ashes: Recent Advances”, *MRS Symposium Proceedings*, Materials Research Society, Pittsburgh, 113: 3-38, (1988).
- [17] Mehta P.K., “Pozzolanic and cementitious by-products—Another look”, *Proceedings of the Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-114, Detroit, 1-43, (1989).
- [18] Mehta P.K., “Influence of fly ash characteristics on the strength of portland-fly ash mixtures”, *Cement and Concrete Research*, 15: 669-674, (1985).
- [19] Shehata M.H. and Thomas M.D.A., “Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali-silica reaction in concrete”, *Cement and Concrete Research*, 32: 341-349, (2002).
- [20] Thomas M., “The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review”, *Cement and Concrete Research*, 41: 1224-1231, (2011).
- [21] Rajabipour F., Giannini E., Dunant C., Ideker J.H. and Thomas M.D.A., “Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps”, *Cement and Concrete Research*, 76: 130-146, (2015).
- [22] Nath P. and Sarker P., “Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete”, *Procedia Engineering*, 14: 1149-1156, (2011).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN:1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Malicious xss code detection with decision tree

*Yazar(lar) (Author(s)): Ömer KASIM*

*ORCID: 0000-0003-4021-5412*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article):** Kasım Ö., “Malicious XSS code detection with decision tree”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 67-72, (2020).

**Erişim linki(To link to this article):**<http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:**10.2339/politeknik.470332

# Malicious XSS Code Detection with Decision Tree

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Ömer KASIM\*

Dumlupınar University, Simav Technology Faculty, Electric and Electronic Engineering, Kütahya, Turkey

(Geliş/Received : 14.10.2018 ; Kabul/Accepted : 20.02.2019)

## ABSTRACT

Dynamic applications such as e-commerce, blogs, forums, e-governance, e-banking and portals that are in these platforms have become a part of our lives. However, a tremendous increase in the use of dynamic web and mobile applications has resulted in security vulnerabilities originating from the Hypertext Markup Language (HTML) coding system. Site-to-site Script Execution (XSS) attack is the largest contributors to security exploits. There are different models according to the dynamic content that XSS attacks use. The interest of the study is composed of attacks on visual content with the "img" tag. In study, an algorithm has been developed to detect XSS attacks with the decision tree which is motivated by the fact that they tend to be easier to implement and interpret than other quantitative data-driven methods. The algorithm that successfully classifies 392 of 400 malicious and clean codes in the data set with 8 different features. This result contributes to the use of secure internet without XSS attacks that use visual content..

**Keywords:** Security vulnerability, XSS attacks, feature extraction, decision tree.

## 1. INTRODUCTION

The dynamic transformation of web and mobile applications with Web 2.0 causes some vulnerability. These vulnerabilities are used to attack systems. These attacks are categorized by the Open Web Application Security Project (OWASP) [1]. In OWASP report, Cross-Site Script Execution attacks (XSS) are the most common attack type. It has been found that XSS attacks have also increased in parallel with an increase in the level of interaction of an application. The most important reason for this increase is due to the fact that the XSS commands operate at the application layer of the Open Systems Interconnection (OSI) architecture. This problem causes most existing intrusion detection systems to have difficulty detecting XSS attacks [1].

As shown in Figure 1, the attacker can use malicious JavaScript, VBScript, ActiveX, Hypertext Markup Language (HTML) or Flash code to attack the dynamic web page in the XSS process. Embedded HTML and

JavaScript codes are the most used ones. In this process, it is possible to execute code to get access to data and cookies on the remote computer with XSS codes [2]. Information such as the user name and password of the user can be obtained by accessing data and cookies on the remote computer.

XSS attacks are divided into three categories: Stored XSS Attack, Reflected XSS Attack and Document Object Model (DOM) [3]. The Stored XSS Attack is done by using fields such as the forum application and a text box that provides the visitor-book style interaction process in the web sites. XSS codes sent via these fields are recorded in the database. Thus, any user who uses the attacking application or visits the page is converted to XSS attack [4]. The Rejected XSS Attack is done with code entry into the Uniform Resource Locator (URL) fields. Users are searched for attacks by social media and URL addresses which is sent via an e-mail. The user who falls into this trap is in the target position by activating

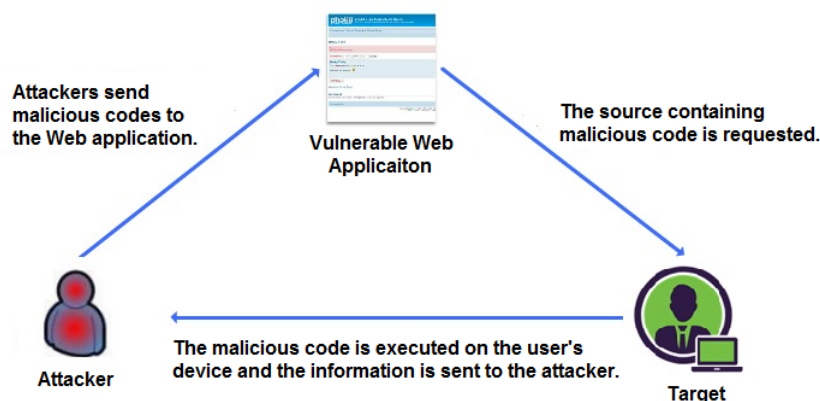


Figure 1. XSS Attack Scheme

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : omer.kasim@dpu.edu.tr

the URL. The important point of this attack is that this attack can be seen only by the user who composed the XSS attack. The target user is in danger because of the

unseen codes [5]. In the DOM XSS attack, the DOM field of the HTML page is changed. With the changing DOM, the payload field in Hyper Text Transfer Protocol (HTTP) is used for different purposes. The requested code in DOM is separated by the payload '#' symbol with the part in the URL.

This character is not received by the server. If malicious codes integrated after this character, this request is processed. The "document.referrer", which represents the URL of the uploading document, is directed with the DOM routing object. The payload is received by the server in the routing header information. Thus, the malicious codes are placed on the page by interfering with the code structure and index page of the web site. These operations are usually done with terminal-side JavaScript codes [6].

Risk reporting, using of SSL, login validation and authorization are used to protect the system from attacks during the design phase [7]. However, a malicious script running in the context of the current user, firewall, encryption method, or Intrusion Detection System (IDS) in XSS attacks may be ineffective in preventing these types of attacks [8]. Because, the XSS codes are run directly in the browser program that causing the application or web page to be damaged. Static, dynamic and hybrid approaches are used to solve this problem [9]. These solutions include some investment strategies in corporations and intuitions. These investments that can be applied in the process of making cyber security investment decisions are grouped into 5 categories. These categories are the determination and measurement of cyber security risks, measurement of the cost and effect of security attacks, measurement of the effectiveness of security technologies and determination of the optimal level of security investments [10]. To determine the investments, the malicious code analysis can be done.

Code propagation analysis, string test and software test tools are used in Static analyzes. One of them, code propagation analysis, is based on flow control structure [11]. Each node in the flow is represented by a label. When a decision variable of a node is observed, the web page is considered vulnerable or no problem in the running code. Another static analysis, String Analysis, uses the Context Free Grammar (CFG) structure [12]. CFG refers to the whole grammar or rules used in language design. Content in CFG structure consists of four features. These features consist of the ending ones, the continuous ones, the relations and the starting

symbol. These 4 labels define the features of the string expressions. In the software-based test process, which is the third static analysis, error injection and penetration tests are used [13]. In dynamic analysis, XSS attacks are not tried to be detected with proxy based solutions. In this process, specific codes are allowed to operate according to the structure of the application and the service model [14]. In some cases, both static and dynamic structures are used together. This is the name given to the hybrid solution. Static and dynamic models are used together according to the application's service model and code structure [15].

There are different solutions in literature to overcome malicious codes which contains XSS. The easiest one is to disable the Javascript command execution process in browser programs. The other solution is Server-side programs. XSS-Guard is the one of them [16]. XSS Guard creates a shadow page for the actual response page of the programs on the server. This process makes it difficult for the attacker to kill or harm the process because the shadow page is accessed instead of the actual response page in the XSS attacks. On terminal side solution is proposed to prevent terminal-side High-Rate Distributed Denial of Service (HDDoS) attacks. In the first step of the work, the data is transformed by preprocessing, then the features of the captured data are extracted and in the last step the  $\alpha$ -divergence test is performed. This process is applied to all incoming and outgoing packets through the proxy. When the distribution is examined, if the threshold value exceeds a predetermined value, the demand is not further processed and the process is terminated [17]. In the work of attack detection by following the proxy process, the parameter values of the request pages and the HTML and JavaScript codes of the response pages are analyzed. The method includes data collection, preprocessing, feature extraction and attack clustering on the most appropriate subset of related properties. In an attack, the JavaScript is disabled by the proposed program [18]. An artificial learning algorithm, on the other hand, detects XSS attacks with self-generated qualities on both static and dynamic structures. In proposed method, high false alarm rate and scaling problems have been observed in the detection process [19,20].

The proposed algorithm resolves the high false positive problem without having to disable Javascript and to make cyber security investment decisions. It is designed as server, client or proxy-side that provides .

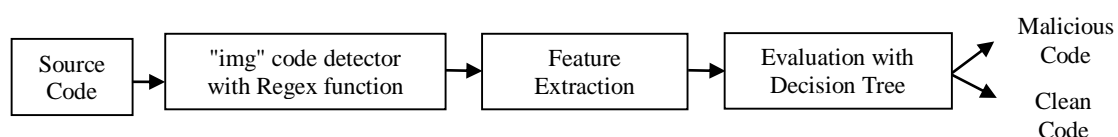


Figure 2. Block Diagram of Algorithm

- Initialize HTML request
- Initialize Regexp Function
- while the img tag token
- Calculate 8 Features
- while img tag matches
- If src,www,http,https are equals 1 and =/,#,hex are equals 0
- Print Code is clear, Keep Going Application or Web Page
- Else
- Print Code is not clear, Block the Web Page or Application

**Figure 3.** Pseudo Codes of the Proposed Algorithm

protection against dynamic and static XSS attacks by using the characteristics of the code. The decision tree method has been used as a classification technique and a predictive approach in order to analyse these characteristics. The trained decision tree algorithm classifies 400 sets of attributes with clean and malicious code of visual html requests in the data set with 98% success. It supports secure internet usage by detecting XSS attacks to be done with html "img" tags.

## 2. PROPOSED APPROACH

Block diagram of the proposed method which includes artificial learning algorithm with the decision tree structure is shown in Figure 2. The source code is received on request. Then the "img" label is detected by Regexp function. If there is "img" label on request, it is analyzed by the proposed method. At analyze stage features of the code is obtained. Then the obtained features are given to the trained decision tree. At final stage the code status is determined as malicious or clean code. Also, the pseudo code of the algorithm is shown in Figure 3.

## 3. DETECTION OF XSS ATTACK

In the experimental part of the study, 3 steps are followed. These are the creation of the data set, feature extraction and evaluation steps.

### 3.1. Collection of Data

The malicious codes used in the training and testing phase of the study were taken from OWASP [21]. These malicious codes contain different XSS attack options. Our scope of in this study is about the malicious visual content. Therefore, the 350 malicious code line contains "img" labels. Then, our dataset is enriched with 50 clean code sets with clean "img" tags. The training and testing dataset of the decision tree is expressed on the Table 1.

**Table 1:** Training and Testing Dataset of Decision Tree

	Clean Code	Malicious Code	Codes in Dataset
<b>Training</b>	16	48	64
<b>Testing</b>	50	350	400

**Table 2:** Clean and Malicious Code Samples from Dataset

<b>Clean Code</b>	<code>&lt;img id="resim" src="http://www.xyz.org/images/slide/slide-2/slide5.jpg"onmouseover="hover(this);"onmouseout="unhover(this);"/&gt;</code>
<b>XSS Malicious Code Structure Disabling WAF</b>	<code>&lt;img src="x:x" onerror="alert(XSS)"&gt;</code>

The code samples of the "img" tag used in web operations that represent the visual content are in the data set of the study. Sample of clean and malicious code of these are shown in Table 2. The clean code which is in the Table 2 is effective in loading and using visual content. On the other hand, the "x: x" in XSS containing malicious code structure allows to exceed the firewall of the application.

### 3.2. Preprocessing and Feature Extraction

This step includes the creation of features to identify aggregated data. With the Regexp function, incoming and outgoing HTML requests are scanned on the terminal or server. For each request that is scanned, the tags are obtained in array form with the token and match sub-functions. When tags are defined with tokens, the parameters and values which are contained in the tags are obtained as a string array with the plug-in function. When "img" tags are derived from the token, the parameters and values of all the lines containing "img" tag are obtained with the matched plug-in. The code of the acquired visual content request contains the feature vector, these parameters and values.

**Table 3:** Features

Feature	Explanation of Feature
f <sub>1</sub>	Img
f <sub>2</sub>	#
f <sub>3</sub>	Hex
f <sub>4</sub>	Src
f <sub>5</sub>	"=" After character "/"
f <sub>6</sub>	www.
f <sub>7</sub>	http://
f <sub>8</sub>	https://

The 8 features obtained from the data set of the worker are described in Table 3. The f<sub>1</sub> feature changes to "1" if it is the "img" tag. When the "img" tag is not found, this feature information remains "0". The second feature is the "#" character. This character is used before the functions in the distressed code lines are called. f<sub>2</sub> feature is "0" if it is not "1" in case of "#" character in "img". In the case of f<sub>3</sub>, these features are updated as "1", otherwise they remain as "0" in the feature vector. The f<sub>4</sub> measures the "src" characters. If these characters are composed of the together, this feature is set to "1". Otherwise the f<sub>4</sub>

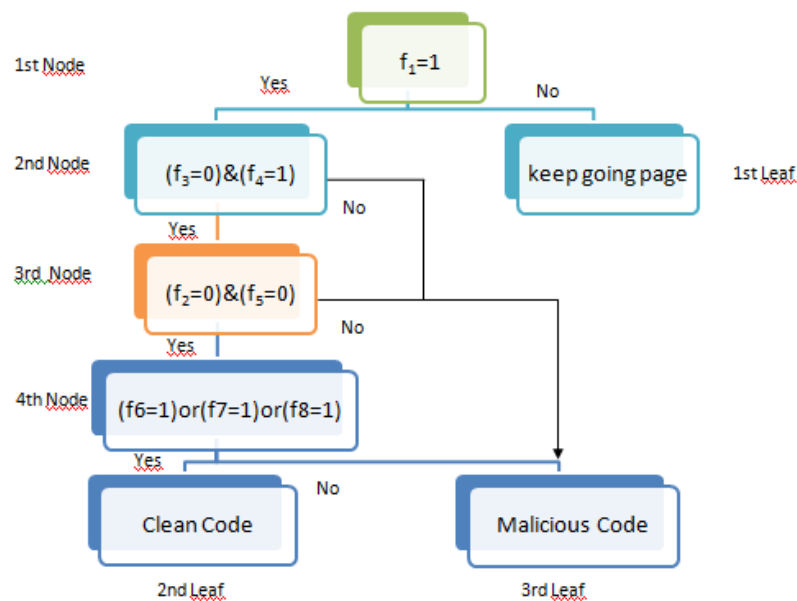


Figure 4. Structure of Decision Tree

feature is set to "0". The = and / characters combination is the another XSS detect feature and it is represented with  $f_5$ . If this combination is in the code then  $f_5$  is set to 1. In the case of a visual request "  $f_6$ ,  $f_7$ , and  $f_8$  when the "src" part has "www", "http" or "https", the update is made in the feature vector as "1" in case of these expressions and as "0" in case of these expressions.

### 3.3. Evaluation with Decision Tree

The decision tree algorithm tends to be easier to implement and interpret than other quantitative data-driven methods [22]. It starts with a single node that covers all the data in the training data set. The data in this node are divided into leaves and placed in the most appropriate class according to the division criterion. This criterion is to maximize the acquisition of information between random sub-samples of the dimensions obtained at each point. The splitting process continues until the minimum criterion or variance stop criterion is obtained. Decision trees and other classification algorithms have been tested and applied to malicious code detection. Generally, decision tree classifiers have been successfully created using data from honeypots and data from normal activities. This analysis leads to the creation of decision rules to identify malicious activity [23]. There are certain labels in the process of defining the XSS attacks in the OWASP report [1]. These labels are used to prepare the training vector of the decision tree. There are 64 raw data in training vector which is composed of 8 feature. The decision tree structure was formed with this vector.

When a decision tree of 8 features expressed in Table 3 is formed, a process as shown in Figure 4 is obtained from the dataset of the work. 8 feature information of each code line with the "img" tag is calculated and passed

through the decision tree. Detection of malicious code is still being carried out at the request stage by obtaining output related to the tree branches.

Decision tree nodes are places where decisions are made in the flow. Leaves are the final step in which decisions are a result. There are 4 nodes and 3 leaves in the decision tree structure designed in the study. The "Code clean", "Code malicious" or "No visual content of the code" in terms of the decisions made at each node is expressed by Leaf 1, Leaf 2 and Leaf 3 respectively.

The first step in the decision tree is to look at the  $f_1$  feature in the first node. In case this value is "1", if 2nd node is "0", it goes to 1st leaf. At node 2,  $f_3$  and  $f_4$  are decided using feature information. If  $f_3$  is "0" and  $f_4$  is "1", the third node is going to 3rd leaf if neither or both of these conditions can be provided. If the values of the features  $f_2$  and  $f_5$  at node 3 are "0", the node 4 is directed to the leaf 3 in other cases. If the value of any one of  $f_6$ ,  $f_7$  and  $f_8$  at node 4 is "1", the analysis is terminated by going to leaf 3 if all values are "0" to leaf 2.

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

XSS is one of the most used attack methods in the direction of OWASP's report [1]. These attacks, which are made through the means of interacting in the application, target the user's cookies. The ability of attackers to run malicious code on the application layer makes XSS detection difficult. XSS-style requests can be blocked by passing the request codes in the page or instantly through a filter. The proposed algorithm which is based on decision trees structure can detect these attacks that can be done with visual tags through "img" tags.



**Table 4:** Classification Result with Confusion Matrix

Predicted Class	Actual class									
	Features	img	#	Hex	Src	"=" After "/"	www.	http://	https://	Clean Code
img		60								
#			40							
Hex				18	2					
Src				2	48					
"=" After "/"						30				
www.							60			
http://								48	2	
https://									38	2
Clean Code										48

First, the code line with the "img" tag is determined by the Regexp function. With the analysis of the string expression in the "img" tag, it is decided by the tree leaf about the case that there is no hex expression after the trace of the word first. After analyzing "#" character and "=" characters, "img" examines whether there is at least one of "www.", "http: //" or "https: //" in triplet. If the decisions in the process are positive for each node, the code is cleared. If any of this process is not successful, the code is malicious.

The data set containing 50 clean img code lines and 350 malicious img code lines has been successfully categorized by the algorithm developed to work cleanly or malicious when the code passed through the decision tree. The distribution of usage of the 400 data features in the data set of the study is shown in Figure 5. Classification Result with Confusion Matrix is obtained from the classification of this data set with decision tree is given in Table 4. 342 of the attack codes containing different tags in the data set were placed in the correct classes. On the other hand, the data containing 8 malicious code that have problems in classification are determined as http and https along with the attributes with "hex" and "src".

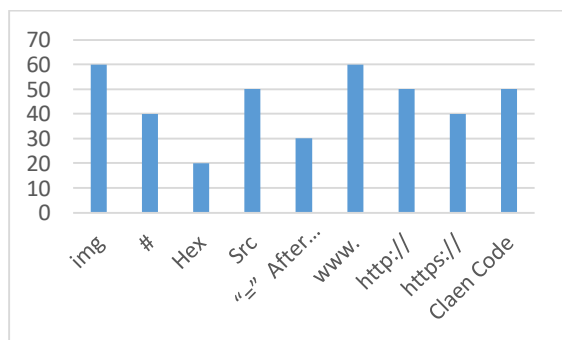
In the case of the detection of the compilation process to the hex codes of the malicious code and the absence of the src tag used next to the "img" tag, two lines of malicious code for the absence of "http" and "https" before the pages are specified as false negative and false

positive. In order to determine clean code distribution with https, 2 lines of code are set to true negative. sensitivity is 98% and specificity is 96%. The results is shown at Table 5.

To create a model, 50 data sets and 50 JavaScript keywords and symbols were created. XOS malicious code was detected using four classifiers, Naive Bayes [24], ADTree [25], SVM [26] and RIPPER [27]. In the test phase, classifiers were used to distinguish between normal and malicious code-containing attack commands. It is seen that the SVM classifier has the highest sensitivity and RIPPER has the highest recall value. In general, the average of malicious tagged scripts by a classifier is 90% [28].

**Table 5:** Table of Confusion Matrix

		Actual class	
		Malicious Code	Clean Code
Predicted class	Detected Code	342 True Positives	48 False Positives
	Non-Detected Code	6 False Negatives	2 True Negatives



**Figure 5.** Frequency of Features in Dataset

The XSS attack system is implemented by using different fields in dynamic content. One of them is XSS attacks on visual content. "Filter bypass-based polyglot", "IMG OnError and JavaScript warning ciphers", and "WAF Bypass Strings for XSS" are XSS attacks using visual content [19]. In various studies, the proxies [13], request quantities of packages [15] and shadow pages instead of real pages [16] are examined. In an Attack Detection and Prevention system uses a whitelist, which may not be always enough can be detect stored XSS attacks [29]. However, proposed algorithm examines the codes at request code instantly. This process is provided protection by blocking the visual contents in case there is a negative attack by testing visual elements of request without loading. Each HTML request can be checked

instantly terminal and server sides or in a proxy. This is an important consequence of this work, where malicious code can be caught if malicious code is sent over the monitoring result visual content.

## REFERENCES

- [1] [https://www.owasp.org/index.php/Top\\_10\\_2013-Top\\_10](https://www.owasp.org/index.php/Top_10_2013-Top_10)
- [2] Garcia A., Navarro A., "Prevention of Cross-Site Scripting Attacks on Current Web Applications", *Greece Proceedings of the OTM Confederated International*, 1770-1784, (2007).
- [3] Imran Y., Pathan A., "Preventing Persistent Cross-Site Scripting (XSS) Attack by Applying Pattern Filtering Approach", *IEEE The 5th International Conference on Information and Communication Technology*, 1-6, (2014).
- [4] Jasmine M., Devi K., George G., "Detecting XSS Based Web Application Vulnerabilities", *International Journal of Computer Technology & Applications*, 8(2): 291-297, (2017).
- [5] Gupta, B., Gupta, S., Gangwar, S., Kumar, M., Meena, P., "Cross-Site Scripting (XSS) Abuse and Defense: Exploitation on Several Testing Bed Environments and Its Defense", *Journal of Information Privacy and Security*, 11(2): 118-136, (2015).
- [6] Dong R.Z., Ling J., Liu Y., "DOM Based XSS Detecting Method Based on Phantomjs", *Proceedings of the International Conference on Applied Mechanics, Mechatronics and Intelligent Systems*, 237-241, (2015).
- [7] Kasım Ö., "Evolving Web Process and Security", *9th International Conference on Information Security and Cryptology*, 149-154, (2016).
- [8] Yılmaz V., Sağiroğlu Ş., "Kurumsal Bilgi Güvenliği ve Standartları Üzerine Bir İnceleme", *Gazi University Journal of Faculty of Engineering and Architecture*, 23(2):507-522, (2008).
- [9] Saha S., "Consideration Points Detecting Cross-Site Scripting", *International Journal of Computer Science and Information Security*, 4(1):1-8, (2009).
- [10] Şentürk, H., Çil, C.Z., Sağiroğlu S., "Siber Güvenlik Yatırım Kararları Üzerine Literatür İncelemesi", *Politeknik Dergisi*, 19(1): 39-51, (2016).
- [11] Zou C.C., Gong W., Towsley D., "Code Red Worm Propagation Modeling and Analysis", *Proceedings of the 9th ACM Conference on Computer and Communications Security*, 138-147, (2002).
- [12] Prithvi B., Venkatakrisnan V.N., "XSS-GUARD: Precise Dynamic Prevention of Cross-Site Scripting Attacks", *International Conference on Detection of Intrusions and Malware, and Vulnerability Assessment*, 23-43, (2008).
- [13] Baykara M., Daş R., Karadoğan İ., "Bilgi Güvenliği Sistemlerinde Kullanılan Araçların İncelenmesi", *Ist International Symposium on Digital Forensics and Security*, 27:231-239, (2013).
- [14] Di Lucca G.A., Fasolino A.R., Mastoianni M., "Identifying Cross Site Scripting Vulnerabilities in Web Applications", *Sixth IEEE International Workshop On Web Site Evolution*, 71-80, (2004).
- [15] Bhuyan M.H., Bhattacharyya D.K., Kalita J.K., "Survey on Incremental Approaches for Network Anomaly Detection", *International Journal of Communication Networks and Information Security (KUST)*, 3(3):226-239, (2011).
- [16] Nithya, V., Pandian, S. L., Malarvizhi, C., "A Survey on Detection and Prevention of Cross-Site Scripting Attack", *International Journal of Security and Its Applications*, 9(3): 139-152, (2015).
- [17] Boro D., Bhattacharyya D.K., "Dyprosd: A Dynamic Protocol Specific Defense for High-Rate DDOS Flooding Attacks", *Microsystem Technologies*, 23(3):593-611, (2017).
- [18] Shahriar, H., Devendran V.K., Haddad H., "Proclick: A Framework for Testing Clickjacking Attacks in Web Applications", *Proceedings of the 6th International Conference on Security of Information and Networks*, 144-151, (2013).
- [19] Goswami S., Hoque N., Bhattacharyya D.K. "An Unsupervised Method for Detection of XSS Attack." *International Journal of Network Security*, 19(5): 761-775, (2017).
- [20] Likarish P., Jung E., Jo I., "Obfuscated Malicious Javascript Detection Using Classification Techniques", *IEEE 4th International Conference on Malicious and Unwanted Software*, 47-54, (2009).
- [21] <https://www.owasp.org/index.php/XSS>
- [22] Abdallah I., Dertimanis V., Mylonas H., Tatsis K., Chatzi E., "Fault Diagnosis of Wind Turbine Structures Using Decision Tree Learning Algorithms with Big Data." *Safety and Reliability-Safe Societies in a Changing World*, 3053-3061, (2018)
- [23] Gregio A., Santos R., Montes A. "Evaluation of Data Mining Techniques for Suspicious Network Activity Classification Using Honeypots Data.", *Proceedings of SPIR*, 6570: 1-10, (2007).
- [24] John G.H., Langley P., "Estimating Continuous Distributions in Bayesian Classifiers", *11th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, 338-345, (1995).
- [25] Freund Y., Mason L., "The Alternating Decision Tree Learning Algorithm", *Proceeding of the 16th International Conference on Machine Learning*, 124-133, (1999).
- [26] Platt J.C., "Using Analytic QP and Sparseness to Speed Training of Support Vector Machines," *Advances in Neural Information Processing Systems*, 557-563, (1999).
- [27] Cohen W., "Fast Effective Rule Induction", *Proceedings of the 12th International Conference on Machine Learning*, 115-123, (1995).
- [28] Sarmah U., Bhattacharyya D.K., Kalita J. K., "A survey of Detection Methods for XSS Attacks", *Journal of Network and Computer Applications*, 118(15):113-143, (2018).
- [29] Maurya S., "Positive Security Model based Server-side Solution for Prevention of Cross-site Scripting Attacks," *Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 1-5, (2015).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu

## *Optimization of 3D printing operation parameters for tensile strength in PLA based sample*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Mustafa GÜNAY<sup>1</sup>, Süleyman GÜNDÜZ<sup>2</sup>, Hakan YILMAZ<sup>3</sup>, Nafiz YAŞAR<sup>4</sup>,  
Ramazan KAÇAR<sup>5</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0002-1281-1359

*ORCID<sup>2</sup>:* 0000-0003-4285-5114

*ORCID<sup>3</sup>:* 0000-0002-8553-388X

*ORCID<sup>4</sup>:* 0000-0002-1427-1384

*ORCID<sup>5</sup>:* 0000-0002-3903-1838

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Günay M., Gündüz S., Yılmaz H., Yaşar N. ve Kaçar R., “PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 73-79, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.422795

# PLA Esaslı Numunelerde Çekme Dayanımı için 3D Baskı İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Mustafa GÜNAY<sup>1\*</sup>, Süleyman GÜNDÜZ<sup>2</sup>, Hakan YILMAZ<sup>3</sup>, Nafiz YAŞAR<sup>4</sup>, Ramazan KAÇAR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Mühendislik Fakültesi, Tıp Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

<sup>4</sup>Yenice Meslek Yüksekokulu, Makine Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 11.05.2018 ; Kabul/Accepted : 25.02.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, ergiyik yığıma modelleme (FDM) esaslı 3D yazıcı kullanılarak üretilen PLA+ numunelerin mekanik özelliklerine baskı hızı, doluluk oranı ve tarama açısının etkileri detaylı olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, Taguchi L<sub>18</sub> deney tasarımına göre 3D yazıcı ile standart çekme test numuneleri hazırlanmıştır. İşlem parametrelerinin (Baskı hızı, doluluk oranı ve tarama açısı) çekme dayanımı üzerindeki etkileri varyans analizi (ANOVA) ile belirlenmiştir. Ayrıca, Taguchi metodolojisi uygulanarak çekme dayanımı için işlem parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır. Sonuç olarak, çekme dayanımı üzerinde en etkin parametre doluluk oranı olurken, sırasıyla tarama açısı ve baskı hızı diğer önemli parametreler olarak tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** 3D baskı, FDM, çekme dayanımı, optimizasyon, PLA.

## Optimization of 3D Printing Operation Parameters for Tensile Strength in PLA Based Sample

### ABSTRACT

In this study, the mechanical properties of PLA+ samples produced by using fused deposition method (FDM) based 3D printer were investigated in detail for the effects of printing speed, infill rate and raster angle. For this purpose, standard tensile test specimens were prepared with a 3D printer according to Taguchi L<sub>18</sub> experimental design. The effects on the tensile strength of the process parameters (printing speed, infill rate and raster angle) were determined by analysis of variance (ANOVA). In addition, the process parameters for the tensile strength were optimized by applying the Taguchi methodology. Consequently, while the most effective parameter on the tensile strength was the infill rate, the raster angle and the printing speed were determined as other important parameters, respectively.

**Keywords:** 3D printing, FDM, tensile strength, optimization, PLA.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde her sektörde olduğu gibi imalat sektöründe de artan teknolojik yenilikler, ürünlerin pazara sürüm süresini kısaltarak firmaların rekabetçi kalabilmeleri adına oldukça önemli bir rol oynamaktadır [1]. Son zamanlarda endüstriyel uygulamalarda farklı ve hızlı prototipleme teknolojilerinin kullanımı giderek artmaktadır. Hızlı prototipleme yöntemlerinden birisi olarak bilinen üç boyutlu (3D) yazıcılar, endüstrinin yanı sıra araştırma ve akademik çalışmalar içinde kullanılmaktadır [2]. Bu teknoloji sayesinde tasarımların bir ön prototipi kolay ve hızlı bir şekilde üretilebilmektedir [3]. 3D yazıcı ile üretim otomotiv, havacılık ve savunma, uzay teknolojileri, mimari yapılar, ürün ve makine tasarımları, medikal cihazlar ve tıbbi uygulamalar gibi birçok alanda kendine yer edinerek yoğun ilgi odağı haline gelmiştir. Ayrıca tıp ve sağlık alanında kişiye ve ihtiyaca özel organ, doku ve implant uygulamalarında kullanımı yaygınlaşmaktadır [4].

Üç boyutlu baskı, diğer adıyla katmanlı imalat ASTM 52900:2015 standardında geleneksel üretim metodolojileri ve kalıplaşmış imalat yöntemleri yerine 3D model verilerinden parçalar oluşturmak için katman üzerine katman oluşturarak materyallerin birleştirilmesi sürecidir [5]. Katmanlı imalat, bir ürünün hem üretim süresini hem de maliyetini düşürmek için oldukça mükemmel bir potansiyele sahiptir. Bu teknoloji için birçok yöntem kullanılabilen olup, yöntemler arasındaki farklılıklar genellikle katmanların nasıl oluşturulduğu ile ilgilidir. Seçici lazer sinterleme (Selective Laser Sintering\_SLS), ergiyik yığıma modelleme (Fused Deposition Modeling\_FDM), Stereolithography (SLA), dijital ışık işleme (Digital Light Processing\_DLP) teknolojileri katmanlı imalat için en çok uygulanan teknolojiler arasındadır [2]. FDM birleştirme yoluyla yığıma teknolojisi olup, bu yöntemde ısı ile şekil alabilen termoplastik (PLA, ABS vb.) malzemeler kullanılmaktadır [6]. FDM teknolojisi, ürün kalitesini ve malzeme özelliklerini etkileyen çok sayıda parametreye sahip karmaşık bir süreçtir ve bu parametrelerin kombinasyonunun anlaşılması oldukça

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : mgunay@karabuk.edu.tr

güçtür [7,8]. FDM baskılı parçaların kalitesi ve performansı üzerinde işlem parametrelerinin (katman kalınlığı, tarama açısı, tarama genişliği, hava boşluğu, dolgu yoğunluğu, baskı yönü ve besleme hızı) önemli bir etkisi vardır [9-11]. Bu yöntemde, mekanik özellikler fonksiyonel parçalar üzerinde oldukça önemli etkilere sahip olup, işlem parametrelerinin mekanik performans üzerindeki etkilerinin incelenmesi büyük önem kazanmaktadır [12]. Diğer yandan, ergiyik yığıma modelleme yöntemi, ürün kalitesini ve malzeme özelliklerini etkileyen çok sayıda parametreye sahip olan karmaşık bir süreçtir ve bu parametrelerin kombinasyonunun anlaşılması genellikle zordur [13].

Literatür incelendiğinde, tarama açısı, baskı hızı ve doluluk oranının ergiyik yığıma modelleme (FDM) yöntemiyle üretilen endüstriyel ürünlerin mekanik özellikleri için en önemli işlem/üretim parametreleri olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalarda genellikle ABS malzemelerin dayanımı incelenmiş olup, en önemli işlem parametrelerinin birlikte etkilerinin incelendiği çalışmaların çok sınırlı olduğu belirlenmiştir. Bu bağlamda, öncelikle PLA+ malzemedeki FDM yöntemi kullanılarak üç farklı doluluk oranı ve baskı hızı ile iki farklı tarama açısında çekme numuneleri üretilmiştir. Çalışma kapsamında, maliyetleri minimuma indirmek amacıyla Taguchi metodolojisi uygulanarak deneysel ve istatistiksel analizler yapılmıştır. Son olarak, işlem parametrelerinin çekme dayanımı üzerindeki etkileri varyans analizi ile değerlendirilmiş ve işlem parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Malzeme Ve Ekipman (Material And Equipment)

Bu çalışmada, mekanik özellikleri incelenen numuneler Polilaktik Asit (PLA) malzemedeki 3D yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan PLA filament ESUN firması tarafından üretilen ve PLA+ ticari ürün adı altında bulunabilen 1.75 mm çapındadır. Ergiyik yığıma modelleme (FDM) yöntemi ile kullanıma uygun olan bu filament için mekanik özellikler Çizelge 1'de verilmiştir [14]. Araştırma kapsamında, PLA'nın kullanılmasının esas nedeni ABS'den daha fazla avantaja sahip bir plastik türü olmasıdır [15]. PLA, yenilenebilir kaynaklardan (mısır nişastası, tapyoka kökleri veya şeker kamışı) üretilen, daha az toksik içeren ve 3D baskıda daha düşük sıcaklıklar gerektiren, dolayısıyla enerji

tüketimini pozitif yönde etkileyen biyolojik olarak çözünebilen bir termoplastik alifatik polyesterdir.

PLA+ esaslı çekme numuneleri delta tipinde sabit basım tablasına sahip bir 3D yazıcıda üretilmiştir. 3D yazıcı, 0.4 mm nozul çapına sahip olup, açık kaynak kodlu yazılımla çalışan düşük maliyetli bir cihazdır. Bu çalışmada, çekme testleri için ASTM D638-IV standardına uygun numuneler hazırlanmıştır. Bu amaçla, ilgili numune katı modelleri Solidworks yazılımında oluşturularak 3D yazıcı için uygun formata dönüştürülmüştür. Numunelerin katı modelleri Repetier-Host yazılımı ile G-code dosyalarına çevrilerek üretime hazır hale getirilmiştir.

### 2.2. Deneysel Tasarım Ve Optimizasyon (Experimental Design And Optimization)

FDM yöntemi ile imal edilen numunelerin mekanik özellikleri işlem parametrelerinin seçimleriyle ilgilidir. Bu bağlamda, üç farklı doluluk oranı (%50, 75 ve 100) ve baskı hızı (30, 60 ve 90 mm/s) ile iki farklı tarama açısı (-45/45° ve 0/90°) belirlenmiş ve Taguchi L<sub>18</sub> deney tasarımı uygulanarak çekme numuneleri basılmıştır. Numunelerin üretiminde baskı sıcaklığı malzeme tedarikçi firmanın önerisine göre belirlenmiş olup, nozul ucu ve tabla sıcaklığı sırasıyla 210°C ve 40°C olarak ayarlanmıştır. Basım sırasındaki ortam sıcaklığı 26°C olarak ölçülmüştür. Çekme numunesi standart kalınlığı ve nozul çapına bağlı olarak çekme numunesi üretimi için 17 katman kullanılmıştır. Bu katmanlardan ilk üç ve son üç tanesi solid olarak adlandırılan tam dolu katman şeklinde ve seçilen tarama açısına paralel olarak basılmıştır. Arada kalan katmanlar ise doluluk oranı parametresine göre oluşturulmuştur. Ayrıca, tüm numunelere 0.3 mm kalınlığında iki adet dış çerçeve eklenmiştir. Numunelerin üretimi için vakumlu koruyucu içerisinde yer alan PLA+ filament paketi açılarak tüm üretim sürecinde aynı malzeme kullanılmıştır. Ürünlerin 3D yazıcı tablası üzerine yerleşimleri tüm üretim aşamalarında aynı tutulmuştur. Bu çalışma kapsamında kullanılan tüm işlem parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çekme dayanımı, bir malzemenin herhangi bir uygulamadaki performans yeteneğinin önemli bir ölçüsüdür. Çekme testleri için uygulanan deney tasarımına göre üçer adet numune üretilmiştir. Delta tipi 3D yazıcı ve numunelerin katmanlı üretim modeli detay görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir. Çekme testleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi bünyesinde bulunan 50 kN kapasiteli SHIMAZDU marka test cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2). Çekme testleri 5 mm/s

Çizelge 1. PLA+ filamentin özellikleri (Properties of PLA+ filament)

Baskı sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Bozulma sıcaklığı (°C,0.45 MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Eğme dayanımı (MPa)	Darbe dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )
205-225	1.24	52	60	29	87	7

**Çizelge 2.** Numune işlem parametreleri (Process parameters of sample)

İşlem parametreleri	Değer
Tarama açısı (°)	(-45/45), (0/90)
Doluluk oranı (%)	50, 75, 100
Baskı hızı (mm/s)	30, 60, 90
Nozul sıcaklığı (°C)	210
Tabla sıcaklığı (°C)	40
Ortam sıcaklığı (°C)	26
Alt kabuk katman sayısı	3
Üst kabuk katman sayısı	3
Dış duvar sayısı	2
Destek durumu	Yok
Tabla kaplaması	Maskeleme bandı
Soğutma	Yok

çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneysel hataları minimize edebilmek için her bir şart için üç deney numunesi test edilmiş, elde edilen çekme dayanımı değerlerinin ortalaması alınarak değerlendirilmeler yapılmıştır. Bu çalışmanın son aşamasında, PLA+ malzemeden katmanlı üretim ile numunelerin üretiminde kullanılan işlem parametrelerinin (tarama açısı, baskı hızı, doluluk oranı) çekme dayanımına bağlı olarak istatistiksel analiz ve optimizasyon yapılmıştır. Bu kapsamda, öncelikle deneysel sonuçlara %95 ( $\alpha=0.05$ ) güven düzeyinde varyans analizi (ANOVA) uygulanarak çekme dayanımı üzerinde doluluk oranı, baskı hızı ve tarama açısının etki seviyeleri belirlenmiştir. İşlem parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi metodolojisi uygulanmıştır. FDM yöntemi kullanılarak basılan numunelerde maksimum çekme dayanımı (performans karakteristiği) istenildiği için işlem

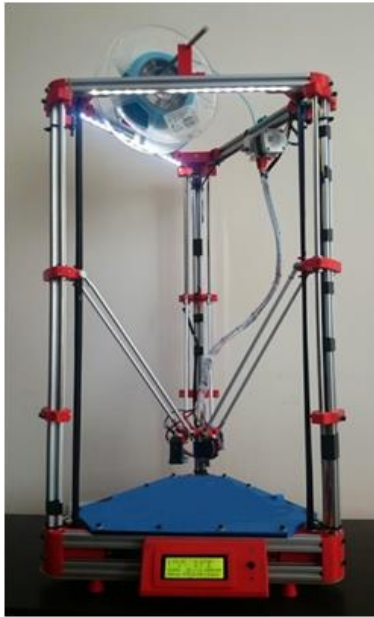
parametrelerin optimizasyonunda Taguchi'nin "en büyük en iyi" amaç fonksiyonu kullanılmıştır (Eş.1). Taguchi, bu parametrelerin seviyelerinin performans karakteristiğini ölçmek için amaç fonksiyonu değerlerini sinyal/gürültü (S/N) oranına dönüştürür. S/N oranları yardımıyla işlem parametrelerinin optimum kombinasyonu belirlenmektedir [16].

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

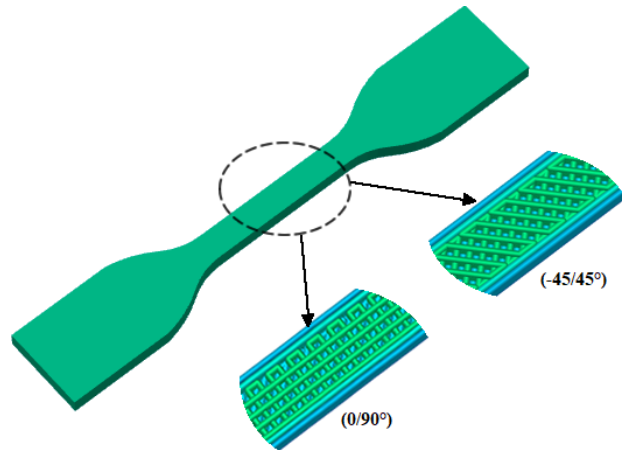
### 3. DENEYSEL VE İSTATİSTİKSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (ASSESSMENT OF EXPERIMENTAL AND STATISTICAL RESULTS)

#### 3.1. İşlem Parametrelerinin Çekme Dayanımına Etkisi (Effect on Tensile Strength of Process Parameters)

3D yazıcı kullanılarak üretilen PLA+ numunelerin mekanik özelliklerine baskı hızı (30, 60, 90 mm/s), doluluk oranı (%50, 75, 100) ve tarama açısının (-45/+45° ve 0/90°) etkisi sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te görülmektedir. Ayrıca, iki farklı tarama açısında %100 doluluk oranında elde üretilen numunelerin çekme testi sonrasında elde edilen gerilme-uzama grafikleri Şekil 5'te gösterilmiştir. 0/90° tarama açısı, Şekil 1b'den görülebileceği gibi, numunenin alternatif katmanlarının FDM makinesi nozulunun yatay düzlemde 0° ve 90° açılarda yön değiştirerek imal edilmesi anlamına gelmektedir. Benzer şekilde, -45/+45° tarama açısı makine nozulu tarafından takip edilen diğer biriktirme düzenini göstermektedir. Baskı hızına bağlı olarak %50, 75 ve 100 doluluk oranları ile -45/+45° ve 0/90° tarama açısında PLA+ malzemesinden üretilen numunelerin çekme dayanımları değişimi Şekil 3'te verilmektedir



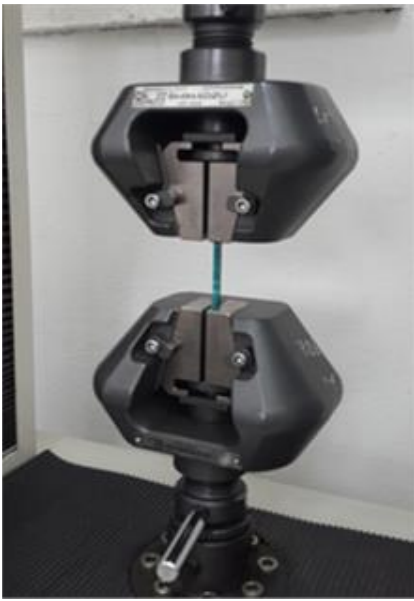
a)



b)

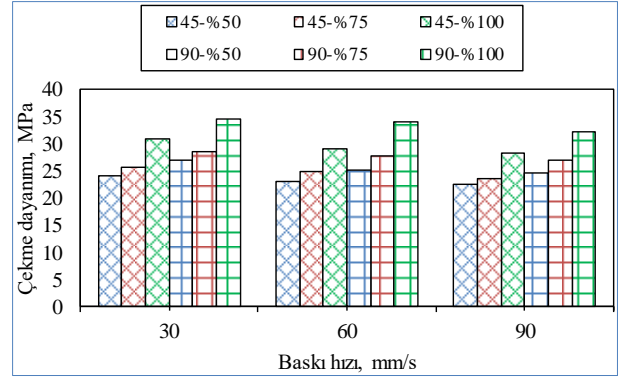
Şekil 1. a) Delta tipi 3D yazıcı, b) Çekme numunesi detayı (a- Delta type 3D printer, b- Tensile sample detail)

Şekil 3 incelendiğinde, çekme dayanımı her iki tarama açısı için benzer eğilimde olup, baskı hızının artmasına bağlı olarak çekme dayanımı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Chacon ve ark. [17], PLA malzemenin mekanik özelliklerine işlem parametrelerinin etkisini araştırmışlar ve sonuç olarak baskı hızının artmasıyla dayanım değerlerinin düştüğünü, fakat yüzde uzama değerlerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada benzer olarak, baskı hızının artması katman kalınlığının düşmesine neden olarak çekme dayanımının azalmasına katkı sağlamıştır. Bu nedenle, FDM uygulamalarında, hem mekanik özelliklerde azalmaya neden olan hem de baskı süresinde önemli bir azalma sağlamayacağı için yüksek baskı hızında üretimden kaçınılmalıdır.

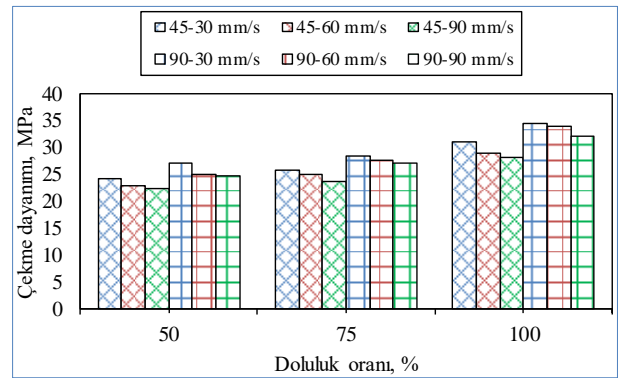


Şekil 2. Çekme test cihazı (Tensile testing device)

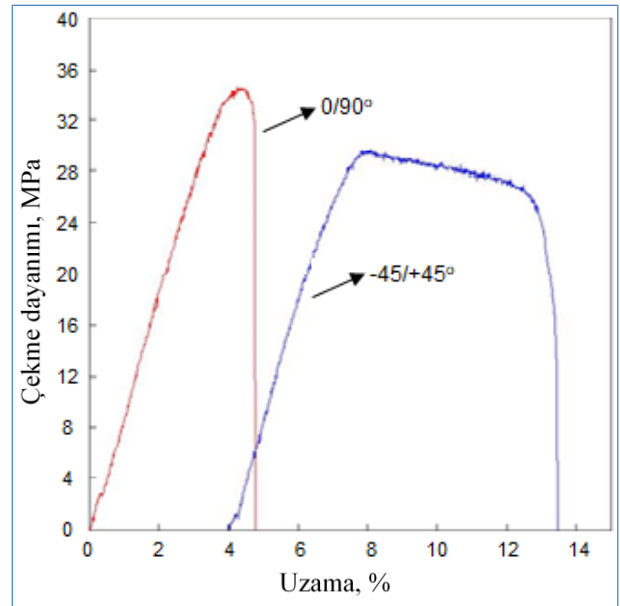
Doluluk oranına bağlı olarak 30, 60 ve 90 mm/s baskı hızı ile  $-45/+45^\circ$  ve  $0/90^\circ$  tarama açısıyla PLA+ malzemesinden üretilen numunelerin çekme dayanımları değişimi Şekil 4'te görülmektedir. Şekil 4'ten görülebileceği gibi, üç farklı baskı hızında ve her iki tarama açısında yönünde elde edilen numunelerin çekme dayanımları artan doluluk oranı ile belirgin bir şekilde artmıştır. Bilindiği gibi malzemelerin çekme dayanımı uygulanan yükün numunenin kesit alanına oranlanmasıyla belirlenir. Üretilen numunelerin kesit alanları aynı olmasına rağmen, kesit alandaki doluluk oranının yüksek olması birim alana düşen çekme yükü taşıma kapasitesini arttıracaktır. Bu sebeple, Samykano ve ark. [18] tarafından bahsedildiği gibi 30, 60 ve 90 mm/s baskı hızlarında ve  $-45/+45^\circ$ ,  $0/90^\circ$  tarama açıları ile üretilen PLA numunelerin hepsi, doluluk oranının artmasına bağlı olarak yüksek dayanım sergilemişlerdir. En yüksek çekme dayanımı %100 doluluk oranı, 30 mm/s baskı hızı ve  $0/90^\circ$  tarama açısına sahip numunede 34.60 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 3. Baskı hızına göre çekme dayanımı değişimi (Variation of tensile strength according to printing speed)



Şekil 4. Doluluk oranına göre çekme dayanımı değişimi (Variation of tensile strength according to infill rate)



Şekil 5. PLA+ numunenin gerilme-uzama grafiği (Stress-strain graph of PLA+ sample)

Şekil 3 ve 4 dikkatlice incelendiğinde, tüm baskı hızı ve doluluk oranları için  $0/90^\circ$  tarama açısıyla üretilen numunelerin çekme dayanımlarının  $-45/+45^\circ$  tarama açısıyla basılan numunelerden daha yüksek olduğu

görülmektedir. Şekil 5'teki gerilme-uzama grafikleri bu sonucu desteklemektedir. Bu sonucun, Ahn ve ark. tarafından bahsedildiği gibi [19] FDM yöntemi ile 3D yazıcı kullanılarak üretilen PLA+ numunelerin anizotropik özellik sergilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer bir ifadeyle, çekme dayanımının tarama açısına bağlı olarak kayda değer bir değişim gösterdiği açıkça grafiklerden görülmektedir. ABS malzeme ile yapılan ilgili çalışmalarda katman kalınlığı, tarama açısı, baskı hızı, doluluk oranı ve hava boşluğu gibi işlem parametrelerinin ergiyik yığılma modelleme ile üretilen parçaların mekanik özelliklerini etkilediği ifade edilmiştir [20-22]. Bu çalışmada, bahsedilen işlem parametrelerinden baskı hızı, tarama açısı ve doluluk oranının numunelerin statik yük etkisi altındaki davranışları üzerinde belirgin etkisi olduğu tespit edilmiştir. Ancak, endüstriyel uygulamalarda fonksiyonel iş parçalarının en önemli mekanik özelliklerinden birisi olan çekme dayanımı üzerinde işlem parametrelerinin etki düzeylerinin belirlenmesi sonuçların uygulanabilirliğini artıracaktır.

**Çizelge 3.** Çekme dayanımı için ANOVA sonuçları (ANOVA results for tensile strength)

Parametre	SD	KT	KO	F değeri	PCR (%)
Baskı hızı	2	14.0470	7.024	36.400	6.23
Doluluk oranı	2	162.013	81.007	419.77	71.80
Tarama açısı	1	45.45	45.452	235.53	20.15
Baskı hızı*Doluluk oranı	4	0.702	0.175	0.910	0.31
Baskı hızı*Tarama açısı	2	0.027	0.013	0.070	0.01
Doluluk oranı*Tarama açısı	2	2.61	1.304	6.760	1.16
Hata	4	0.772	0.193		0.34
Toplam	17	225.621			

İşlem parametrelerinin çekme dayanımı üzerindeki etki seviyelerini belirlemek amacıyla %95 güven düzeyinde varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır (Çizelge 3). Burada, her bir parametrenin önem seviyesini gösteren P değerleri ile serbestlik derecesi (SD), kareler toplamı (KT), kareler ortalaması (KO) ve F değerleri görülmektedir. Parametrelerin önem seviyesi, ANOVA tablosundaki P değeri dikkate alınarak belirlenmektedir. Ayrıca, her bir değişkenin çekme dayanımı üzerindeki yüzde etki oranları (Percentage Contribution Ratio\_PCR)

hesaplanmış olup, ANOVA tablosunda verilmiştir. Parametrelerin çekme dayanımı üzerindeki yüzde etki oranları incelendiğinde, en fazla öneme sahip değişken %71.80'lik PCR ile doluluk oranı olarak belirlenmiştir. Çekme dayanımı üzerinde istatistiksel olarak önem sıralaması, tarama açısı (%20.15 PCR) ve baskı hızı (%6.23 PCR) şeklinde olduğu tespit edilmiştir.

### 3.2. Optimizasyon Sonuçları (Optimization Results)

FDM yöntemi ile en iyi mekanik özelliklerde endüstriyel ürünler üretebilmek için işlem parametrelerinin gerçek seviyelerini belirlemek zor olmakla birlikte zaman ve maliyet açısından önemli kayıplara neden olacaktır. Bunun temel nedeni, çok sayıda FDM parametresinin ve bu özellikleri etkileyen parametreler arasında yüksek derecede bir etkileşimin olmasıdır. Bu bağlamda, deney tasarımına bağlı olarak bir optimizasyon metodolojisi uygulamak gerçeğe en yakın çözümün bulunmasını kolaylaştıracaktır [16]. Bu nedenle hem ilgili literatüre hem de sürdürülebilir imalata katkı vermesi açısından, bunun gibi süreçlerde yaygın olarak kullanılan Taguchi metodolojisinin uygulanması çok anlamlı olacaktır. Bu çalışmada, literatür araştırmalarına göre belirlenen en önemli FDM işlem parametrelerinden üç tanesine (baskı hızı, doluluk oranı ve tarama açısı) göre üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

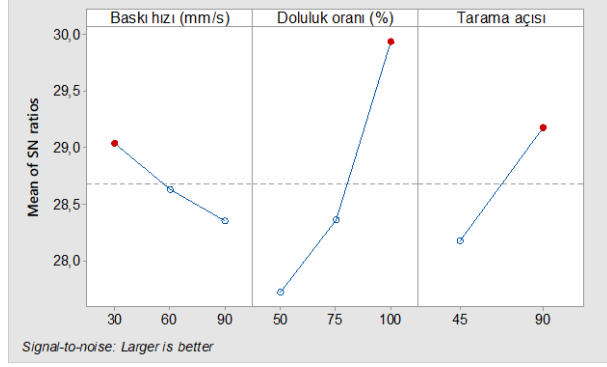
Çekme testi için numuneler, FDM yöntemi ile Taguchi L<sub>18</sub> deney tasarımı uygulanarak 3D yazıcıdan üretilmiştir. PLA+ malzemeden basılan numuneler için çekme dayanımının maksimum olmasını sağlayan işlem parametrelerinin bulunması amacıyla Taguchi'nin "en büyük en iyi yaklaşımına" göre Eşitlik (1) ile S/N oranları hesaplanmıştır. İşlem parametrelerine göre çekme dayanımının S/N oranları değişimini incelemek için Şekil 5'teki ana etki grafikleri çizilmiştir. Ayrıca, çekme dayanımı için hesaplanan ortalama S/N oranlarının değişkenlere göre dağılımı Çizelge 4'te verilmiştir.

Taguchi metodolojine göre optimum parametre seviyelerini belirlemek için işlem parametrelerinin S/N oranları incelenmektedir. Maksimum S/N oranı performans karakteristiği (çekme dayanımı) için en uygun işlem parametresini gösterir [16]. Şekil 5'teki ana etki grafiklerinden baskı hızının çekme dayanımı üzerinde negatif yönde bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır.

**Çizelge 4.** Çekme dayanımının ortalama S/N oranları (Mean S/N ratios for tensile strength)

Seviye	Baskı hızı (mm/s)	Doluluk oranı (%)	Tarama açısı (°)
1	29.04*	27.73	28.18
2	28.64	28.37	29.18*
3	28.36	29.94*	
Delta	0.68	2.21	1.00
*Parametrelerin optimum seviyeleri			





Şekil 5. Çekme dayanımının S/N oranları için ana etki grafiği (Main effect graph for S/N ratios of tensile strength)

Çizelge 4'teki S/N oranları incelenecek olursa, çekme dayanımına göre optimum parametrelerin baskı hızının 1.seviyesi (30 mm/s), doluluk oranının 3.seviyesi (%100) ve tarama açısının 2.seviyesi (0/90°) olduğu görülmektedir. Ayrıca, Çizelge 4'teki S/N oranlarının maksimum ve minimum değerleri arasındaki fark (delta) değerlerinden en etkin parametrenin doluluk oranı olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, FDM yöntemiyle üretilen plastik esaslı parçaların basma dayanımlarında olduğu gibi [23], çekme dayanımları açısından da en önemli işlem parametresinin doluluk oranı olduğunu göstermektedir. Diğer yandan, varyans analizi sonuçları ve optimum işlem parametrelerine göre elde edilen sonuçların tutarlılığı göze çarpmaktadır. Buradan, FDM yöntemiyle üretilen endüstriyel parçaların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde Taguchi metodolojisinin uygulanabileceği açıkça görülmektedir. İleride yapılacak araştırmalarda, FDM ile üretilen endüstriyel plastik ürünler için önemli diğer mekanik özellikler dikkate alınarak çoklu performans karakteristikleri için optimizasyon süreçleri uygulanabilir ve mekanik özelliklerin tahmini için matematiksel modeller geliştirilebilir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, PLA+ malzemeden ergiyik yığıma modelleme ile 3D yazıcı kullanılarak üretilen numunelerde, baskı hızı, doluluk oranı ve tarama açısının çekme dayanımına etkileri varyans analizi incelenmiştir. Ayrıca, Taguchi metodolojisi kullanılarak optimum işlem parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- -45/+45° ve 0/90° tarama açısında üretilen PLA+ malzemelerinin hepsinde baskı hızının artmasıyla dayanım değerleri azalırken, doluluk oranının artmasına bağlı olarak dayanım değerleri artmıştır.
- %50, 75 ve 100 doluluk oranı ile 30, 60 ve 90 mm/s baskı hızında 0/90° tarama açısıyla üretilen numunelerin çekme dayanımı -45/45° tarama açısıyla üretilenden daha yüksek bulunmuştur.

- ANOVA sonuçlarına göre çekme dayanımı üzerinde en etkili parametre %71.80'lik PCR ile doluluk oranı olarak belirlenmiştir.
- Taguchi optimizasyonu sonucunda, maksimum çekme dayanımı için 30 mm/s baskı hızı, %100 doluluk oranı ve 0/90° tarama açısı optimum işlem parametreleri olarak tespit edilmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Delikanlı K., Sofu M.M. ve Bekci U., "Üretim sektöründe hızlı direkt imalat sistemlerinin yeri ve önemi", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4: 33-39, (2005).
- [2] Dizon J.R.C., Espera A.H., Chen Q. and Advincula R.C., "Mechanical characterization of 3D-printed polymers", *Additive Manufacturing*, 20: 44-67, (2018).
- [3] Polzin C., Spath S. and Seitz H., "Characterization and evaluation of a PMMA-based 3D printing process", *Rapid Prototyping Journal*, 19(1): 37-43, (2013).
- [4] Karagöz M. ve Cerit A.A., "Kişiye özel implant tasarımlarının 3 boyutlu yazıcılarla üretilmesi", *International Symposium On 3D Printing Technologies*, 311-317, (2016).
- [5] Lee J.Y., An J. and Chua C.K., "Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials", *Applied Materials Today*, 7: 120-133, (2017).
- [6] Turner B.N., Strong R. and Gold S.A., "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. process design and modeling", *Rapid Prototyping Journal*, 20(3): 192-204, (2014).
- [7] Casavola C., Cazzato A., Moramarco V. and Pappalettere C., "Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory", *Materials and Design*, 90: 453-458, (2016).
- [8] Rankouhi B., Javadpour S., Delfanian F. and Letcher T., "Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS respect to layer thickness and orientation", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16: 467-481, (2016).
- [9] Tymrak B.M., Kreiger M. and Pearce J.M., "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3D printers under realistic environmental conditions", *Materials and Design*, 58: 242-246, (2014).
- [10] Domingo M., Puigriol J. M., Garcia A.A., Lluma J., Borros S. and Reyes G., "Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling polycarbonate parts", *Materials and Design*, 83: 670-677, (2015).
- [11] Sood A.K., Ohdar R.K. and Mahapatra S.S., "Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts", *Materials and Design*, 31: 287-295, (2010).
- [12] Vaezi M. and Chua C.K., "Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53: 275-284, (2011).
- [13] Mohamed O.A., Masood S.H. and Bhowmik J.L., "Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future

- prospects”, *Advances in Manufacturing*, 3: 42–53, (2015).
- [14] ESUN 3D. <http://www.esun3d.net/products/142.html>.
- [15] Fratila D. and Rotaru H., Additive Manufacturing-A Sustainable Manufacturing Route, *MATEC Web of Conferences*, 94, (2017).
- [16] Taguchi G., Chowdhury S. and Wu Y., “Taguchi's Quality Engineering Handbook, *John Wiley & Sons, Inc.*, New Jersey, USA, (2005).
- [17] Chacon J.M., Caminero M.A., Garcia-Plaza E. and Nunez P.J., “Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection”, *Materials and Design*, 124: 143–157, (2017).
- [18] Samykano M., Selvamani S.K., Kadirgama K., Ngui W.K., Kanagaraj G. and Sudhakar K., “Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2019), <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03313-0>
- [19] Ahn S.H., Montero M., Odell D., Roundy S. and Wright P.K., “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS”, *Rapid Prototyping Journal*, 8(4): 248–257, (2002).
- [20] Lee C.S., Kim S.G. and Ahn S.H., “Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts”, *Journal of Materials Processing Technology*, 8: 248–257, (2007).
- [21] Lee B.H., Abdullah J. and Khan Z.A., “Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object”, *Journal of Materials Processing Technology*, 169: 54–61, (2005).
- [22] Wu W., Geng P., Li G., Zhao D., Zhang H. and Zhao J., “Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS”, *Materials*, 8: 5834–5846, (2015).
- [23] Zaman U.K., Boesch E., Siadat A., Rivette M. and Baqai A.A., “Impact of fused deposition modeling (FDM) process parameters on strength of built parts using Taguchi's design of experiments”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2018), <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3014-6>



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Kalça protezi stabilitesinin harmonik cevap analizi ile değerlendirilmesi

## *Evaluation of hip prosthesis stability via harmonic response analysis*

Yazar(lar) (Author(s)): Talip ÇELİK<sup>1</sup>, Yasin KİŞİOĞLU<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-0033-2454

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-9819-2551

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Çelik T. ve Kişioğlu Y., “Kalça protezi stabilitesinin harmonik cevap analizi ile değerlendirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 81-84, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.467624

# Kalça Protezi Stabilitesinin Harmonik Cevap Analizi ile Değerlendirilmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Talip ÇELİK\*, Yasin KIŞIOĞLU**

Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 05.10.2018 ; Kabul/Accepted : 26.02.2019)

## ÖZ

Ortopedi ve diş hekimliği alanında kullanılan implant ve protezlerde en sık karşılaşılan problem gevşeme problemidir. Bu sorun sebebi ile implantlar ve protezler işlevlerini yerine getiremez hale gelir. Bu gevşeme sorununun ameliyat sonrası takibi ve erken tespiti çok önemlidir. Ortopedi alanında kullanılan yöntemlerin halihazırda gevşemeyi tespit etme başarısı düşük olduğundan alternatif bir yöntem geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada da alternatif kullanılabilir yöntem olan titreşim yönteminin ameliyat sonrası gevşemeyi tespiti sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Modellemesi yapılan femur kemiği ve kalça protezinin harmonik cevap analizi ile değerlendirilmesi yapılmıştır. Ameliyat sonrası femur kemiğinin malzeme özelliklerindeki değişimin etkisi de analize katılmıştır. Sonuç olarak gevşeme derecesi azaldıkça elde edilen frekans ve genlik değerlerinin de azaldığı görülmüştür. Bu sayede titreşim yönteminin ameliyat sonrası takipte kemik yoğunluğundaki değişime rağmen başarılı olabileceği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Titreşim yöntemi, sonlu elemanlar analizi, harmonik cevap analizi, gevşeme.

# Evaluation of Hip Prosthesis Stability via Harmonic Response Analysis

## ABSTRACT

The most common problem in implants and prosthesis used in the field of orthopedics and dentistry is the loosening. Implants and prosthesis are unable to function due to this problem. Postoperative follow-up and early detection of this loosening problem is very important. Since the methods used in the orthopedics are already having a low success in identifying relaxation, an alternative method has to be developed. In this study, the determination of postoperative loosening using vibration method was evaluated via finite element method. Modeling of femoral bone and hip prosthesis were evaluated by harmonic response analysis. The effect of the changing properties of the material in the femoral bone was also included in the analysis. As a result of this study, the frequency and amplitude values decreased as the degree of loosening decreased. Thus, it was observed that the vibration method could be successful despite the change in bone density in the postoperative follow-up.

**Keywords:** Vibration method, finite element analysis, harmonic response analysis, loosening.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İmplantlar ve protezler ortopedi ve diş hekimliği alanlarında sıklıkla tedavi amaçlı olarak kullanılmaktadır. Kullanılan implant ve protezler yeterli stabilite ile kemiğe yerleştirilmediğinde zamanla gevşer ve işlevini yerine getiremez hale gelir [1]. Bu sebeple ilk ameliyattan daha zor ve maliyetli olan revizyon ameliyatı yapılması gerekir. Hem hasta için hem de cerrah için zor olan bu durum karşımıza büyük bir sorun olarak çıkmaktadır.

Ortopedi alanında en sık yapılan ameliyatlardan biri olan kalça protezi ameliyatlarında gevşeme oluşma riski çok yüksektir. Dünya genelinde yaklaşık 1.2 milyondan fazla kalça protezi ameliyatları yapılmakta ve bunların yaklaşık %10'u gevşeme sebebi ile tekrar ameliyat edilmektedir [2]. Gelişen teknoloji ve tedavi olanakları ile ortalama yaşam süresi artacağı öngörülürse kalça protezi ameliyatı sayısı daha da artacağı tahmin

edilebilir. Bu sebeple ortopedi ve diş hekimliği alanında önemli bir sorun olan gevşeme sorununun azaltılması, mümkünse ortadan kaldırılması gerekmektedir. Halihazırda ortopedi alanında gevşeme tespiti radyolojik görüntüleme yöntemleri ile yapılmaktadır. Bu yöntemin gevşemeyi tespit etme başarısı oldukça düşük olduğundan alternatif yöntemler geliştirilmesi gerekmektedir [3]. Literatürde titreşim yönteminin gevşeme tespitinde radyolojik görüntüleme yöntemine alternatif olacağı vurgulanmıştır [3]. Titreşim analizi ile sistemin doğal frekansı veya sisteme verilen belirli genlik ve frekanstaki titreşime sistemin verdiği cevap değerlendirilerek gevşeme tespit edilir. Doğal frekansı etkileyen faktörlerden biri kemik yoğunluğu değişimidir. Diğer faktör ise protez ile femur kemiği arasındaki kondağa bağlıdır. Kalça protezi ameliyatları sonrası kemik yoğunluğu ilk 3 aylık süreçte %8.5, 6 aylık süreçte %11.2, bir yıl sonunda yaklaşık %12.4 oranında düşmektedir [4]. Bu durumda ameliyat sonrası gevşeme takibinde bu dikkate alınmalıdır.

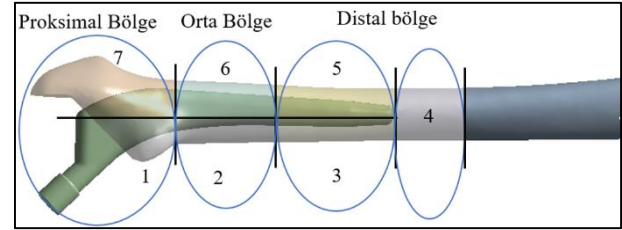
\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : celiktalp@gmail.com

Bu çalışmada da sistemin doğal frekanslarını sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirlenmesi ile ameliyat sonrası gevşeme tespit ve takibinde titreşim yönteminin kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmıştır. Ayrıca, harmonik cevap analizi ile kalça protezi stabilitesi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu sayede ileriki çalışmalarda titreşim yönteminin kalça protezi gevşemesi ve takibinde uygulanabilirliği belirlenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

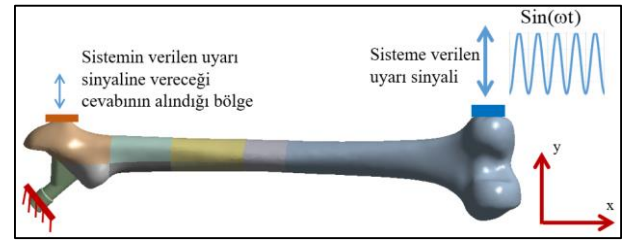
Öncelikle femur ve kalça protezi bileşenleri modellenmiştir. Femurun 3 boyutlu modeli MIMICS (Materialise, Leuven, Belçika) 11.0 programı kullanılarak BT (Bilgisayarlı Tomografi) görüntülerinden elde edilmiştir. MIMICS yazılımından nokta bulutu verisi ile elde edilen femur modeli Geomagic Studio 10 (Raindrop Inc. ABD) tersine mühendislik programında katı model olarak oluşturulmuş ve IGES veri formatında SolidWorks (Dassault Systems, ABD) yazılımına aktarılmıştır. Kalça protezi modeli SolidWorks yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Gerekli protez ölçüleri TIPSAN (TIPSAN A.Ş., Türkiye) firmasına ait katogdan ve protez üzerinden kumpas yardımı ile elde edilmiştir. Modelleme işlemleri tamamlandıktan sonra titreşim analizleri için Ansys Workbench 12.0 yazılımına aktarılmıştır. Genellikle gevşeme sorunu çimentosuz tip kalça protezlerinde olduğundan çimentosuz kalça protezi seçilmiştir. Kalça protezi malzemesi, Ti6Al4V alaşımının mekanik özelliklerine göre alınmıştır ( $E=110000$  MPa,  $\nu=0.33$ ). Kemik malzeme özellikleri BT görüntülerine dayandırılarak geliştirilen ampirik formüller sayesinde MIMICS yazılımında her node'un mekanik özellikleri kemik yoğunluğuna bağlı olarak atanmıştır [5]. Titreşim analizlerinde sistemi oluşturan parçaların yoğunluk değişimleri önemli olduğundan bu çalışmada bu değişim de değerlendirilmiştir. Buna göre femur-protez modelinde yoğunluk değişim bölgeleri Şekil 1'deki gibi ayrılmış ve bu değişim oranlarına göre

3, 6 ve 12 aylık periyotlarda analize katılmıştır. Genel olarak oluşturulan modeller ve yapılan analizler Çizelge 1'de tanımlandığı gibi gerçekleştirilmiştir. Stabil femur-protezlerde kontak tipleri bonded (yapışık), stabilite azaldıkça bonded kontaklar debonded (yapışık olmayan) kontakla dönüştüğü için sürtünmeli ve sürtünmesiz kontaklar tanımlanmıştır [6,7]. Element boyutları protez için 1 mm, kemik için 4 mm olarak yakınsama çalışması ile elde edilmiştir. Ayrıca kontak bölgesi 0.5 mm element boyutu ile daha sık ağ örgüsü oluşturulmuştur.



Şekil 1. Femur-protez modeli ve kemik yoğunluğu değişim bölgeleri (Femur-prosthesis model and the regions of bone density changing)

Sonlu elemanlar analizinde uygulanan sınır şartları Şekil 2'deki gibi protez başından x, y ve z yönlerinde sabitlenmiş ve aynı zamanda rotasyona izin verilmiştir. Distal femurdan (diz eklemi) genliği 10 olan 100 Hz ile 1000 Hz arasında harmonik titreşim verilmiştir. Sönüm oranı ( $\xi$ ) sıfır olarak tanımlanmıştır. Frekansın cevabı femurun büyük trokanter bölgesinden Şekil 2'de gösterildiği bölgeden alınmıştır.



Şekil 2. Sonlu elemanlar modal analizi için kullanılan sınır şartları (The boundary conditions for finite element modal analysis)

Çizelge 1. Sonlu elemanlar analizi için tanımlanan modellerin kontak durumları ve kemik yoğunluk değişimleri (Contact types of the models defined for finite element analysis and changes of bone density)

	Analiz 1		Analiz 2		Analiz 3	
	KT	KYD (%)	KT	KYD (%)	KT	KYD (%)
Ameliyat sonrası	Bonded	-	Debonded (sürtünmesiz kontak, $k=0$ )	-	Debonded (sürtünmesiz kontak, $k=0$ )	-
Ameliyattan 3 ay sonra	Bonded	-8,5	Proksimal bonded, orta ve distal bölge Sürtünmeli kontak ( $k=0.5$ )	-	Proksimal bonded, orta ve distal bölge Sürtünmeli kontak ( $k=0.5$ )	-8,5
Ameliyattan 6 ay sonra	Bonded	-11,2	Proksimal ve orta bonded, distal sürtünmeli ( $k=1$ )	-	Proksimal ve orta bonded, distal sürtünmeli ( $k=1$ )	-11,2
Ameliyattan 12 ay sonra	Bonded	-12,4	Bonded	-	Bonded	-12,4

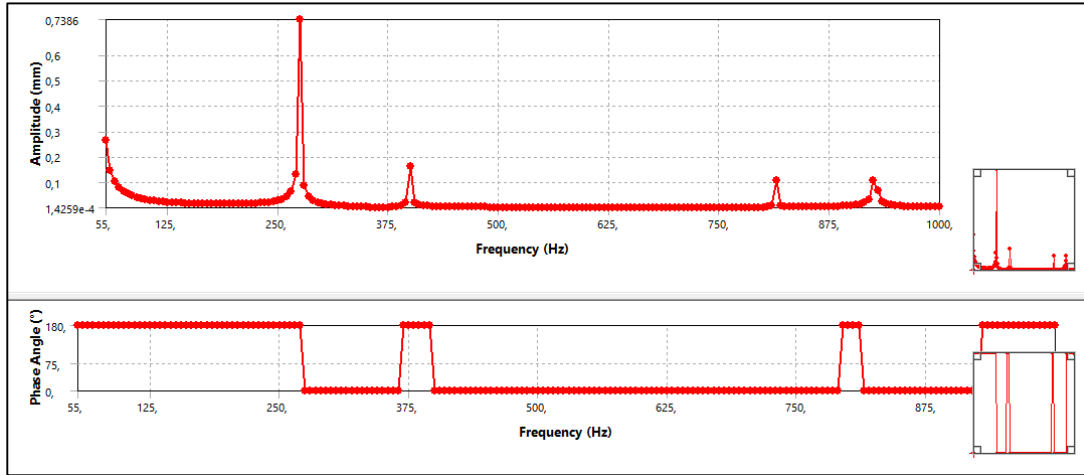
KT: Kontak Türü; KYD: Kemik Yoğunluk Değişimi; k: sürtünme katsayısı

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Şekil 3’de femur-protez modelinden stabil halde elde edilen genlik-frekans ve faz açısı grafiği verilmiştir. Stabil halde proksimal femurdan alınan genlik değeri maksimum 0.7386 mm olarak elde edilmiştir. 275 Hz frekansta alınan bu değer ayrıca sistemin doğal frekansıdır. Stabil femurdan elde edilen bu değerler referans alınarak diğer sonuçlar değerlendirilmiştir.

ve orta bölge gevşemesi protez ile kemik arasında daha çok boşluk oluştuğunu ve bu boşluk sebebi ile genliğin daha yüksek çıktığı söylenebilir. Aynı mantık ile total deformasyon sonuçları değerlendirilebilir.

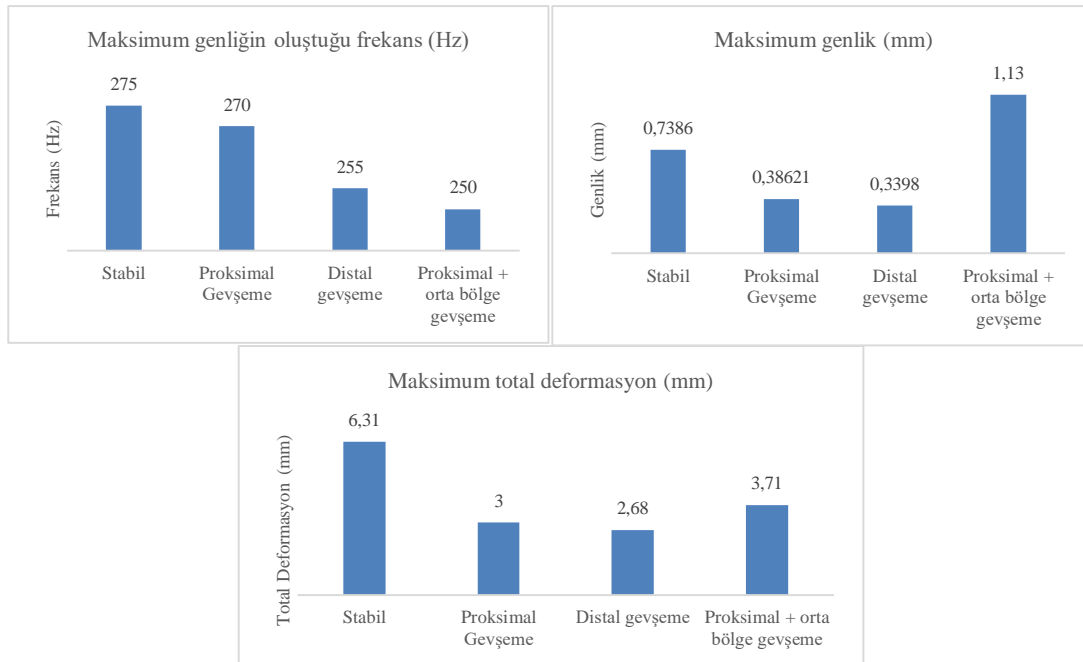
Bu çalışma ile stabil durumdaki femur-protez sisteminin doğal frekansı daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu da stabilite düştükçe doğal frekans değerlerinin de azaldığı göz önüne alınırsa ameliyat sonrası gevşeme takibi için önemli bir sonuç vermektedir. Diğer önemli bir sonuç ise



Şekil 4. Stabil durumda femur-protez modelinden elde edilen frekans cevapları (Frequency responses obtained from stable femur-prosthesis model)

Şekil 4’de frekans, genlik ve maksimum deformasyon değerleri protezin stabilitesine göre nasıl değiştiğini göstermektedir. Buradan stabilite düştükçe maksimum genliğin oluştuğu frekans değeri de azalmaktadır. Yani sistemin doğal frekansları stabilite seviyesine göre azalmaktadır. Ayrıca, genlik değerleri de proksimal ve orta bölge gevşemiş model hariç azalmaktadır. Proksimal

titreşim ile elde edilen genlik değerlerindeki değişimdir. Stabil durumda bu genlik değerleri yüksek çıkmaktadır. Bu da gevşeme takibinde doğal frekans ile birlikte gevşemeyi doğru bir şekilde ve derecede tespit etmede önemli bir gösterge olabilir. Ayrıca, femur ile protez arasındaki kontak yüzeylerindeki temas durumlarına göre de elde edilen genlik değerleri değişmektedir. Stabil



Şekil 3. Frekans, genlik ve total deformasyon grafikleri (The graphs of frequency, amplitude and total deformation)

durumda iken uyarma frekansı ile sistemin doğal frekansı üst üste geldiğinde rezonans oluştuğundan yüksek genlikler elde edilmektedir. Ayrıca kontak temas yüzeyleri azaldıkça da genlik değeri artmaktadır. Bu da değerlendirmede dikkat edilmesi gereken önemli bir değişken olmaktadır.

Kalça protezi ameliyatları sonrası gevşeme tespitini erken ve doğru bir şekilde tespit etmek hem hasta yaşam kalitesi açısından hem de maliyetler noktasında önemli yararlar sağlayacaktır. Bu konu ile alakalı farklı tespit yöntemleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Özellikle diş hekimliği alanında önemli ilerlemeler kaydedilmiş ve diş implantının stabilitesini belirleyen cihazlar piyasaya sürülmüştür. Bu cihazlar implantı yeterli sağlamlıkta diş yuvasına yerleştirilip yerleştirilmediği hakkında diş hekimine bilgi vermekte ve bu sayede ilerideki implant gevşeme riskini azaltmaktadır. Periotest ve Osstell cihazları bunlara örnek olarak gösterilebilir. Ortopedi alanında da özellikle kalça protezinin yeterli stabilite ile yerleştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır [8,9]. ISAC cihazı ortopedi alanında geliştirilmiş bir cihazdır. Bu cihaz genel olarak uygulanan bir moment değerine karşılık kemik ile protez arasındaki hareket miktarının ölçümüne dayanmaktadır. Kullanımı zor olduğundan alternatif çalışmalar yapılmıştır. Bu alternatif çalışmalar da titreşim yönteminin en uygun yöntem olabileceği belirlenmiştir [10]. Diğer bir çalışmada distal femurdan titreşim verilerle proksimal femurdan ivmeölçer vasıtası ile değerler alınmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir [11,12]. Bu çalışmalarda ileriki dönemde kemik yoğunluğu azalması sebebi ile sonuçlardaki değişim incelenmemiştir. Bu çalışmada ise sonlu elemanlar metodu kullanılarak ameliyat sonrasındaki kemik yoğunluğu değişimi de analize katılmış ve sonuçlar buna göre değerlendirilmiştir.

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Sonuç olarak titreşim yöntemi kalça protezi ameliyatlarında ileriki dönemde meydana gelen gevşeme sorununun tespiti için alternatif bir yöntem olduğu gösterilmiş ve değerlendirmede kemik yoğunluğunun sonuçlara etkisi göz ardı edilmemiştir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma 216M316 proje numarası ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Ayrıca sorumlu yazar, 2211-C öncelikli alanlar burs programı kapsamında yurtiçi doktora bursu verdiği için TÜBİTAK'a teşekkür eder.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Malchau H., Herberts P., Eisler T., Garellick G. and Soderman P., "The Swedish Total Hip Replacement Register" *J. Bone Joint Surg. Am.*, 86A: 2-20, (2002).
- [2] Dreinhofer K.E., "Indications for total hip replacement: comparison of assessments of orthopaedic surgeons and referring physicians", *Ann. Rheum. Dis.*, 65: 1346-1350, (2006).
- [3] Georgiou A.P. and Cunningham J.L., "Accurate diagnosis of hip prosthesis loosening using a vibrational technique", *Clin. Biomech.*, 16: 315-323, (2001).
- [4] Ike H., Inaba Y., Kobayashi N., Hirata Y., Yukizawa Y., Aoki C., Choe H. and Saito T., "Comparison between mechanical stress and bone mineral density in the femur after total hip arthroplasty by using subject-specific finite element analyses", *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 18: 1056-1065, (2014).
- [5] Rho J. Y., Hobatho M. C. and Ashman R. B., "Relations of Mechanical-Properties to Density and Ct Numbers in Human Bone", *Med. Eng. Phys.*, 17: 347-355, (1995).
- [6] Oshkour A. A., Abu Osman N. A., Bayat M., Afshar R. and Berto F., "Three-dimensional finite element analyses of functionally graded femoral prostheses with different geometrical configurations", *Materials & Design*, 56: 998-1008, 2014.
- [7] Goshulak P., Samiezadeh S., Aziz M. S. R., Bougherara H., Zdero R. and Schemitsch E. H., "The biomechanical effect of anteversion and modular neck offset on stress shielding for short-stem versus conventional long-stem hip implants", *Med. Eng. Phys.*, 38: 232-240, (2016).
- [8] Jacques S. V. N., Pastrav C., Zahariuc A. and Perre G. V. D., "Analysis of the fixation quality of cementless hip prostheses using a vibrational technique", *ISMA*, Leuven, Belgium, 20-22 September, (2004).
- [9] Kassi J.-P., Heller M. O., Stoeckle U., Perka C. and Duda G. N., "Stair climbing is more critical than walking in pre-clinical assessment of primary stability in cementless THA in vitro", *J. Biomech.*, 38: 1143-1154, 2005.
- [10] Pastrav L. C., Jacques S. V. N., Jonkers I., Perre G. and Mulier M., "In vivo evaluation of a vibration analysis technique for the per-operative monitoring of the fixation of hip prostheses", *J. Orthop. Surg. Res.*, 4: 10-12, (2009).
- [11] Puers R., Catrysse M., Vandevoorde G., Collier R. J., Louridas E., Burny F., Donkerwolcke M. and Moulart F., "A telemetry system for the detection of hip prosthesis loosening by vibration analysis", *Sensors and Actuators A: Physical*, 85: 42-47, (2000).
- [12] Çelik T., "Ortopedik İmplantlarda Mekanik Kararlılığın Analizi", *Doktora Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



## A study on shopping malls performance criterias analysis using AHP method

### *AHP yöntemi kullanarak alışveriş merkezleri performans kriterleri analizi üzerine bir çalışma*

*Yazar(lar) (Author(s)): Emine Elif NEBATİ<sup>1</sup>, İsmail EKMEKÇİ<sup>2</sup>*

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-3950-4279

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-2247-2549

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article):** Nebati E. E, ve Ekmekçi İ., “A study on shopping malls performance criterias analysis using AHP method”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 85-95, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.473568



# A Study On Shopping Malls Performance Criterias Analysis Using AHP Method

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Emine Elif NEBATİ\*, İsmail EKMEKÇİ**

Istanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Türkiye

(Geliş/Received : 22.10.2018 ; Kabul/Accepted : 27.02.2019)

## ABSTRACT

In recent years, with the increase in the number of shopping centers and consumer expectations, comprehensive research on the performance evaluation of shopping centers has started to be needed. In the performance evaluation process, it is very important to determine the correct measurement criteria. In this study, the performance measurement criteria were determined by reviewing the literature and interviewing experts and managers in the shopping center sector. In the next step, the Analytical Hierarchy Process (AHP), a multi-criteria decision making (MCDM) method, was used to determine the significance levels of these criteria and a new performance index model was hereby developed. The proposed method consists of a total of 140 criteria including six main criteria (green building, investors, visitors, tenants, shopping mall turnover, and social life) and 134 sub-criteria. As far as we know, this study is the first to propose a model for measuring the performance of shopping malls.

**Keywords:** Shopping malls, multi-criteria decision making, analytical hierarchy process, performance measurement.

## AHP Yöntemi Kullanarak Alışveriş Merkezleri Performans Kriterleri Analizi Üzerine Bir Çalışma

### ÖZ

Son yıllarda alışveriş merkezleri sayısındaki artış ve tüketici beklentilerinin yükselmesi ile birlikte alışveriş merkezleri'nin performans değerlendirilmesi ile ilgili araştırmalara ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Performans değerlendirilmesi sürecinde doğru ölçüm kriterlerinin belirlenmesi çok önemlidir. Çalışmada, performans ölçüm kriterleri literatür çalışmaları ve alışveriş merkezi sektöründe uzman ve yöneticilik yapmış kişilerle görüşülerek belirlenmiştir. Bir sonraki adımda, bu kriterlerin önem ağırlıklarını belirleme sürecinde çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemi olan Analytic Hierarchy Process (AHP) yöntemi kullanılmış ve yeni bir performans indeks modeli geliştirilmiştir. Önerilen model, yeşil bina, yatırımcı, ziyaretçi, kiracı, avm ciro, sosyal yaşam ana kriterleri altında 134 alt kriter olmak üzere toplamda 140 kriter tanımlanmıştır. Bu çalışma, bildiğimiz kadarıyla alışveriş merkezlerinin performansını ölçmek için bir model öneren ilk çalışmadır.

**Anahtar Kelimeler:** Alışveriş merkezleri, çok kriterli karar verme, analitik hiyerarşi süreci, performans ölçümü.

### 1. INTRODUCTION

As the historical evolution of shopping malls is examined on a global scale, it is known that the transformation of trade areas to include shopping centers spread rapidly over the whole world in a short period of time. Turkey started being influenced by other countries in the 1950s and giant retail chains, like Migros Markets, were then opened in the country. By the 1980s, with the increasing interest in imported goods, the demand for shopping centers with these products peaked. According to Gottdiener, shopping malls are designed to be machines that transform capital into money, and they are defined as places that people long for to meet their physical and social needs and experience a safe, traffic-free, and conditioned urban environment. ([1], [2]). In recent times, shopping malls have become one of the most common alternatives to traditional shopping. A shopping center is a cluster of independent shops, planned and developed by one or several entities, with a common

objective [3]. Lately, with accelerating technological development and the increasing importance of shopping in people's social lives, it has been observed that shopping malls are not only centers for shopping anymore. Instead, they are enclosed or open social spaces that provide services for entertainment, food and beverages, and cultural and other such activities. This drastic change in shopping malls has resulted both from economics and from social causes. In recent times, many factors including the increase in the use of cars, demands for growth in product range, the use of credit cards, and the speed of urbanization have been quite effective in increasing the number of shopping centers. In the face of rising competition, which results from the increase in the number of shopping centers, shopping center administrations are now looking for ways to generate problem-solving mechanisms to tackle these seriously changing developments and create structural transformations. Particularly in recent years, owing to the increase in the number of ordinary shopping malls, it has become necessary to analyze the current situation, reveal deficiencies, and develop possible solutions. Today, it is

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : eenebati@ticaret.edu.tr

a fact that increases in workloads, recreation, and leisure time have influenced active consumption preferences. The need for innovative alternatives has become inevitable. Businesses that aim to maintain their presences effectively and productively have to keep focusing on improvement with the help of actual situation assessments.

In particular, for large enterprises such as shopping malls, performance measurements in a sustainable framework can make positive contributions. At this stage, it is very important to determine performance evaluation criteria correctly. Some decisions must be made in the process of determining the importance levels of these criteria. For this reason, the Analytic Hierarchy Process (AHP) method, a multi-criteria (MCDM) method, was used to make decisions for multi-criteria problems that were aimed to evaluate large enterprises such as shopping malls. In the study, we defined a total of 140 criteria consisting of 6 main criteria (green building, investors, tenants, visitors, turnover and social life) and 134 sub-criteria, all of which are helpful to evaluate the performances of shopping malls in different areas [appendix-1]. A new and an unprecedented index model were proposed. In forming and developing the structure of the proposed model, we conducted a detailed literature review regarding sector-related data. As a result of the research, the main criteria and sub-criteria were determined by taking into consideration missing points in the literature, basic concepts of shopping malls, and expert opinions. In the next step, the hierarchical structure model was created. In this model, the main criteria are shown at the highest level while the sub-criteria are at the lower levels. The main criteria of the shopping center performance index are available in the Figure 1. The sub-criteria schemes of each main criteria are given in the respective examples [Figure.2–Figure.7]. As the final step, experts were asked to evaluate the pairwise survey's efficacy by reviewing shopping malls in Istanbul. Consequently, with the application of the AHP method, the data for weight measurements were obtained for the determined criteria during the Istanbul malls evaluation. In both national and international literature, numerous studies have so far been conducted on shopping centers. However, a comprehensive examination of these studies revealed that each of them evaluate different aspects of shopping malls. For instance, while one research paper examines consumer shopping behaviors and the types of consumers, another paper focuses on the factors affecting shop atmosphere such as cleanliness, lightening, ambiance and similar such issues. Some of the studies regarding shopping malls are below:

E. Cengiz and B. Özden, (2002) examined buying behavior and conduct research on factors that influence visitors and tenants in preferring the shopping mall [4]. In the study, researchers discuss visitors' reasons for preference, what characteristics of malls are liked by customers, and what services provided by the mall are liked and used [4,5]. Kristy E. Reynolds and others'

(2002) compared traditional malls and factory outlets' shopper typologies and discussed implications for retail strategy [6]. Zacarias puts forward in his study (2003) that entertainment activities and areas strengthen shopping centers. According to him, entertainment activities and dedicated areas in the shopping center increase the duration of the time spent by visitors in malls and thus affect the profile of visitors and their planning processes [2,7]. Ibicioglu's (2005) research aimed to examine visitors' demographic characteristics and visitors' behaviors. He suggests that malls need to develop new strategies and alternatives for middle-aged and elderly adults. This study, which is assisted by statistical techniques, demonstrates that there is a strong relationship between education level and going out/having fun, income level, and visiting frequency [8]. Akat and others' (2006) made a study regarding buying behaviors of customers' in a mall in Bursa. In the study, a correlation is observed between customers' age and shopping frequency, education level, and paying methods [9]. Yiu and Yau discuss in their study (2006) that there are six main factors that determine the success of shopping centers and can be used to compare their performances. According to the researchers, these factors include location, architectural design, promotion activities, property management, leasing strategies, and tenancy conditions [2,10]. Ngai points out in his study (2007) that the first of the nine quantitative factors that can be used to determine the performance of shopping malls is detailed population information containing various demographic characteristics such as age groups. The rest of the factors are the distribution of household income and expenditure items (food, clothing, etc.); socio-economic characteristics of the population; and measures of accessibility including road quality, bus services, bus stops, presence of parking spaces in the malls, car ownership, and rail system services [2,11]. Morrison et al. (2010) demonstrate that odor (pleasant) and music, which are sub-factors of store atmosphere, positively affect the customer's feelings and trigger him/her to take action in the store. In their study, they further explain that the two sub-factors lead to a positive increase in the time and amount of money spent in the store along with the level of behaviors of satisfaction [12]. Vilnai-Yavetz and Gilboa argue in their study (2010) that hygiene provides satisfaction and confidence. The two researchers state that the cleanliness of the service area has a significant impact on customers' feelings of satisfaction. They therefore claim that there is an intense correlation between pleasure, trust, the cleanliness of the service area and the consumer behaviors [13]. Reikli in her study (2012), evaluates the key factors behind the success of the shopping malls. And she researched that there are four main factors that impact the performances of shopping malls: location, customer mix, tenant mix, and evaluations of shopping center success [2,14]. Narjes Haj-Salem and others (2016) researched what factors drive mall loyalty of male and female shoppers This study aims to explain how service

and product quality, prices, and mall atmosphere affect the mall loyalty of male and female shoppers [15]. Amit Mittal and Deepika Jhamb's research (2016) discusses determinants of shopping mall attractiveness. According to researchers, merchandising, variety, milieu, and convenience are these determinants [16]. Johan Anselmsson's research (2016) examines the positive relationship between developments in the mall sector, boosted sales Figures, and visiting frequency. Moreover, it seeks an answer on how to compete with online shopping, which has noticeably increased in the last decade [17]. Wessam el-Abd and others (2018) investigate the design of roof windows in the context of daylight performance. This paper suggests new designs to optimize daylight performance, and it also gives a shopping mall from Cairo as an example [18]. The above-mentioned studies show that there is not any consistency in the literature about the factors behind the performances of shopping malls. As such, the different performance data revealed by different researchers have been examined. There is no comprehensive and extensive study that touches upon all the fields of shopping malls that we propose in our study. Thus, it can be said that this study is the first of its kind in the related literature. It is hoped that it will provide a significant and positive contribution to the literature by filling the gaps in related studies.

**2. METHODOLOGY**

**2.1. Analytic Hierarchy Process (AHP)**

The AHP is a multiple criteria decision-making technique that allows subjective as well as objective factors to be considered in the decision-making process. The AHP allows the active participation of decision-makers in reaching agreements, and it gives managers a rational basis on which to make decisions. The AHP is based on the following three principles: decomposition, comparative judgment, and synthesis of priorities [19]. The AHP was first introduced by Myers and Alpert in 1968 [20]. It was developed by Professor Thomas Lorie Saaty in 1977 as a model for solving decision-making problems. The AHP method helps decision makers by showing the correlation between purposes, criteria, sub-criteria, and alternatives to model the most complicated problems in a multi-level hierarchical structure. The AHP requires a well-structured problem represented as a hierarchy with the goal at the top. The subsequent levels contain the criteria and sub-criteria, while alternatives lie

at the bottom of the hierarchy [21]. The implementation steps of this method are as follows:

1. The problem should be clearly defined and the objectives should be determined.
2. Starting from the objectives, the main criteria and the lowest-level alternatives are placed in a hierarchical structure.
3. In order to determine which of the alternatives and criteria are more dominant, the pairwise comparison between the alternatives and criteria is made using the scale expressed in Table 1. Comparison matrices are (nxn) square matrix sizes. When the comparisons and matrices are formed, the pairwise comparison scale in Table 1 is used [22].
4. In order to normalize each column in the pairwise comparison matrix, the total number of columns is calculated and the normalized matrix is formed by dividing the elements of the matrix into the respective column sum.
5. The row sum of the normalized matrices, which are formed for each alternative and criteria, is determined and then the weight vector matrix is obtained.
6. In the weight matrix obtained with the weight vector, the weight values for each criteria or alternative are multiplied by the column elements of the pairwise comparison matrix of that criteria or alternative, and the total weighted matrix is thereby acquired.
7. The sum of the row values of the total prioritized matrix is divided into the row values of the weight vector matrix, and the arithmetic mean of the elements of the (nx1)-sized new matrix is calculated to obtain the weight values of the criteria or alternatives.
8. When calculating the consistency index [23], primarily, the CI value is found:  

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$$
 (1) where CI = Consistency Index.
9. In the last step, the consistency ratio can be calculated by the combination of the values of the randomness scores and the combination of CI, where CR = Consistency Ratio and RI = Randomness Indicator. The consistency ratio in the AHP method should be less than 0.10. If the calculated value is greater than 0.10, the pairwise comparison matrix should be checked again and the steps are repeated after the corrections to be made.
10. The priorities of the alternatives calculated within the framework of the criteria and the priorities resulting from the pairwise comparisons of the criteria are multiplied for

**Table 1.** Scale of pairwise comparison values [24].

Numerical Value	Definition	Explanation
1	Equal importance	Two activities contribute equally to the objective
3	Weak importance of one over another	Experience and judgement slightly to moderately favor one activity over another
5	Essential or strong Importance	Experience and judgement strongly or essentially favor one activity over another
7	Demonstrated importance	An activity is strongly favored over another and its dominance is showed in practice
9	Absolute importance	The evidence of favoring one activity over another is of the highest degree possible of an affirmation
2, 4, 6, 8	Intermediate values between two adjacent judgement value	Used to represent compromises between the preferences in weights 1, 3, 5, 7, and 9

each alternative, and the last desired weight value can be calculated.

### 3. PROPOSAL OF MEASURING PERFORMANCE CRITERIAS AND RESULTS

As the level of competition increases in business, the importance of performance evaluation is similarly increasing day by day. Accurate determination of performance evaluation criteria is the most important step in the evaluation of performance. Several factors have been considered when evaluating shopping center performance. In the model we proposed for the shopping mall sector, a total of 140 criteria were defined, including 6 main criteria in Figure.3 and 134 sub-criteria in Figures [5-7-9-11-13-15]. The process of determining weight level of the criteria in the model was as follows: First, we reviewed the literature in detail. These criteria were evaluated by face-to-face interviews with experts. Then, by using the Superdecision v2.6 package program, hierarchical structures were created [Figure.1].

In the next step, the pair survey research presented to the experts [Figure.2], and the experts were asked to evaluate these criteria according to their significance by considering the shopping centers in Istanbul using Saatty’s 1–9 scale. In Figureures [3-5-7-9-11-13-15] the main criteria of the shopping center performance index and the sub-criterion charts of each main criterion are listed, and their annotations are given in Appendix A. To share an example, the program screenshots of the tenant performance index are shown in Figure 1 and Figure 2. In the survey research, for each criterion, the geometric averages of the scores obtained from each expert were calculated and entered into the program. Within the direction of the data acquired via the program, the data in the tables of each sub-criteria were multiplied by the weights of the main criteria. The results were evaluated and the weights of the determined criteria in the shopping centers were revealed. First, for each main criterion, followed the weight numbers are given below [Figure.4].

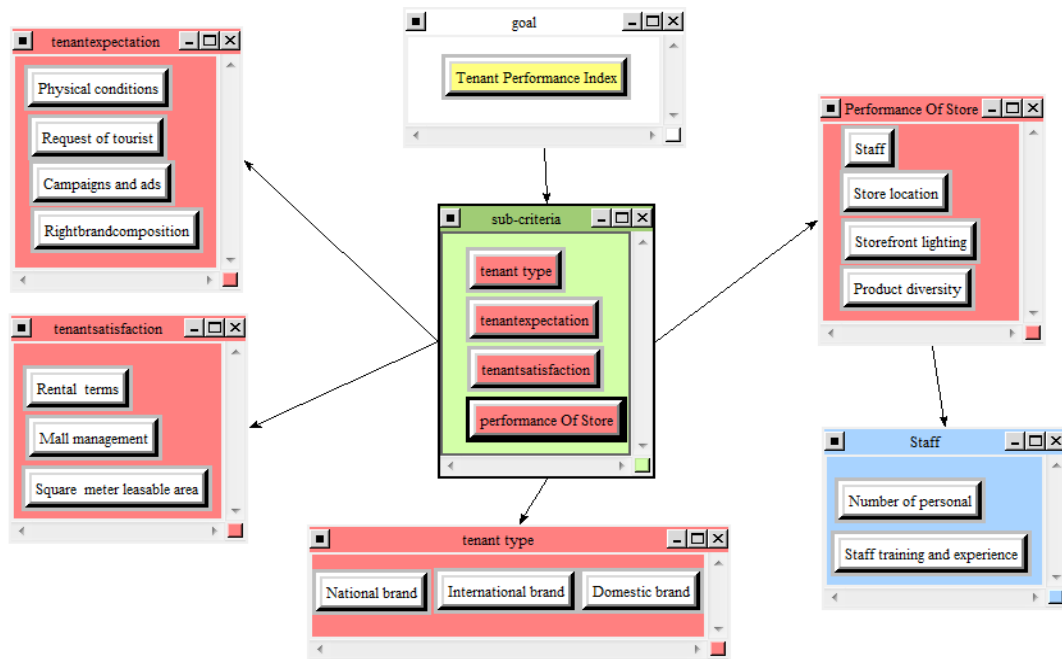


Figure 1. Superdecision program main screen image of tenant performance index

Graphical	Verbal	Matrix	Questionnaire	Direct																	
Comparisons wrt "Tenant Performance Index" node in "sub-criteria" cluster																					
Storeperformance is equally to moderately more important than tenant type																					
1. Storeperformance~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	tenant type
2. Storeperformance~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	tenantexpectati~
3. Storeperformance~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	tenantsatisfact~
4. tenant type	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	tenantexpectati~
5. tenant type	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	tenantsatisfact~
6. tenantexpectati~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	tenantsatisfact~

Figure 2. Screen image of pairwise comparison questionnaire



Figure 3. Hierarchical structure of shopping mall performance index main criteria

### Weights Of Main Criterias

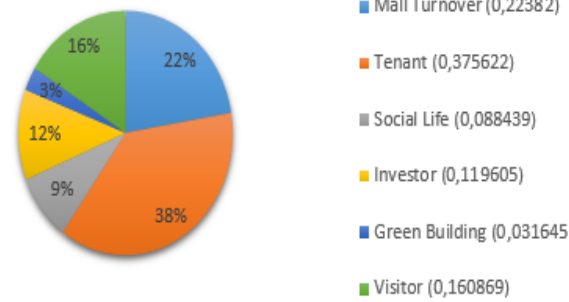


Figure 4. Weights of Main Criterias in shopping mall performance index

There are 6 main criteria in the shopping mall performance index; Green Building (A), Investors (B), Visitors (C), Tenants (D), Mall Turnover (E), and Social life (F) in Figure 3. Definitions of criteria are in Appendix 1.

When Figure 6 is examined, we can see that the most important sub-criterion in the green building category of shopping center performance is building management (0,005024). Then, we can see that there are additional important criteria in green building performance such as mall interior space life quality (0,003499), innovation (0,003061) and marketing (0,002512).

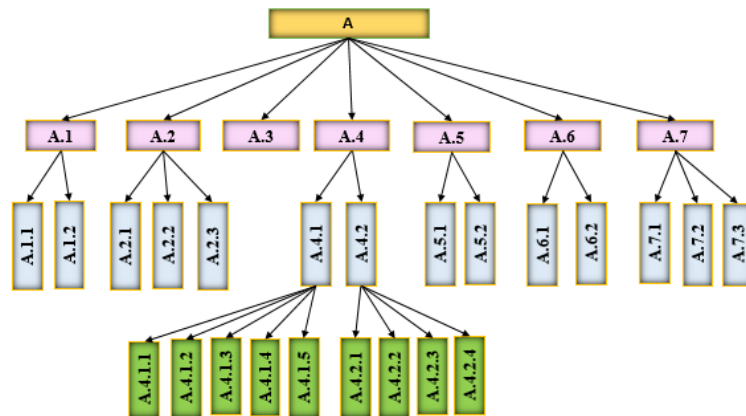
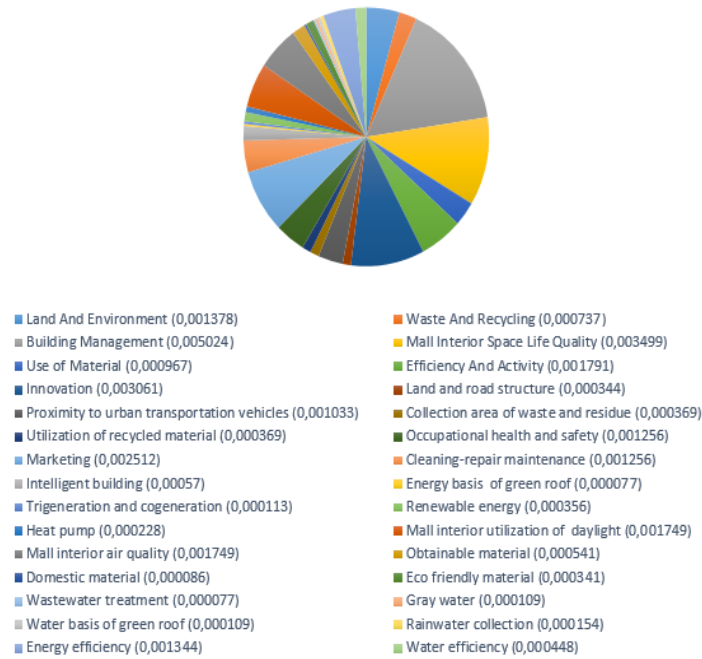


Figure 5. Hierarchical structure of green building performance index

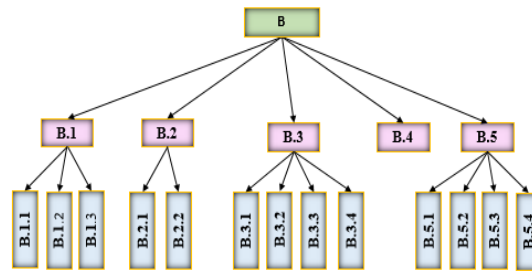
When Figure 4 is examined, it is seen that the most important criteria of shopping center performance is the tenant performance index with the highest weight (0,375622). Once the six main criteria were identified, each main criterion was divided into the sub-criteria. The weight values of the sub-criteria of each main criterion are shown below.

When Figure 8 is examined, we can see that the most important criteria in the investor category of shopping mall performance is Brand composition (0,028684), the highest weight in the criteria. The rest of the criteria are as follows: shopping mall location (0,020715), accessibility to shopping center (0,015536), targeted customer (0,010653), the population of the region (0,008737), social economic status group (0,006914), shopping mall category (0,005355), competition with the environment (0,005179), and income level (0,004795).

**Weights Of Green Building Performance Criteria**

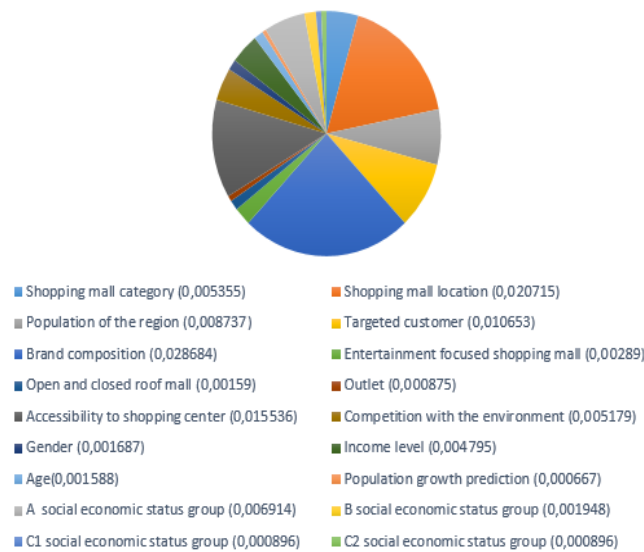


**Figure 6.** Weights of sub-criteria of green building performance index



**Figure 7.** Hierarchical structure of investor performance index

**Weights Of Investor Performance Criteria**



**Figure 8.** Weights of sub-criteria of investor performance index

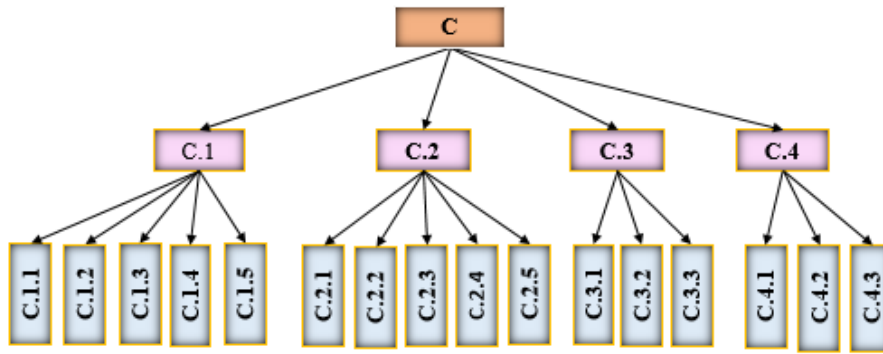


Figure 9. Hierarchical structure of visitor performance index

### Weights Of Visitor Performance Criterias

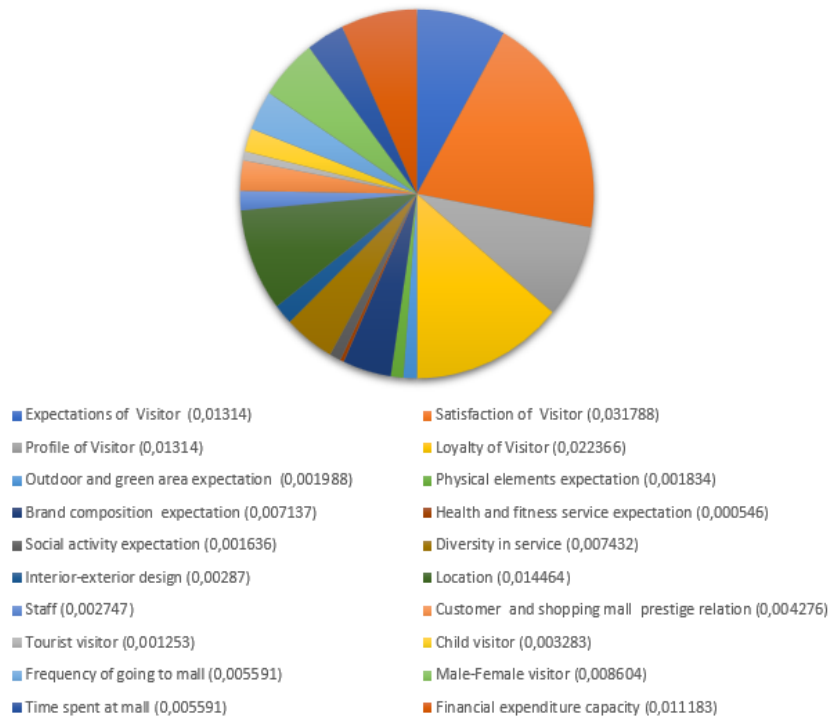


Figure 10. Weights of sub-criteria of visitor performance index

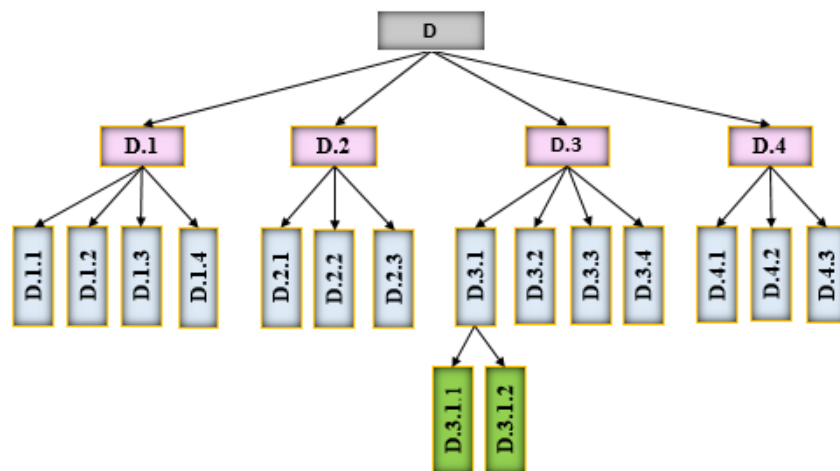
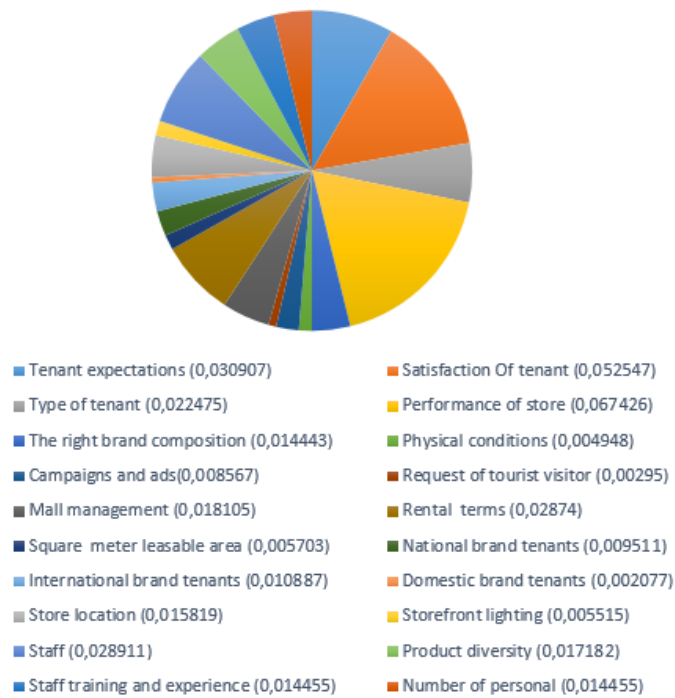


Figure 11. Hierarchical structure of tenant performance index

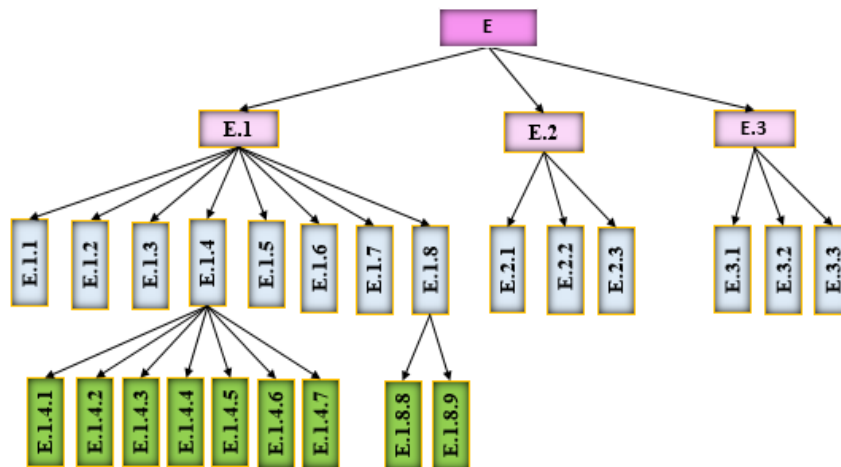
When Figure 10 is examined, it can be seen that the most important criteria in the aspect of visitors in shopping center performance is visitor satisfaction with the highest weight (0,031788). Other important factors are visitor loyalty (0,022366), location (0,014464), expectations of visitors (0,013140), profile of visitors (0,013140), and financial expenditure capacity (0,011183).

The data of Figure 12 demonstrate that the most important criterion in terms of tenants in shopping mall performance is Store performance, which has the highest weight (0,067426). The other significant criteria include tenant satisfaction (0,052547), tenant expectations (0,030907), personnel (0,028911), rental terms (0,028740), tenant type (0,022475), shopping mall management (0,018105), and product diversity (0,017182).

**Weights Of Tenant Performance Criterias**



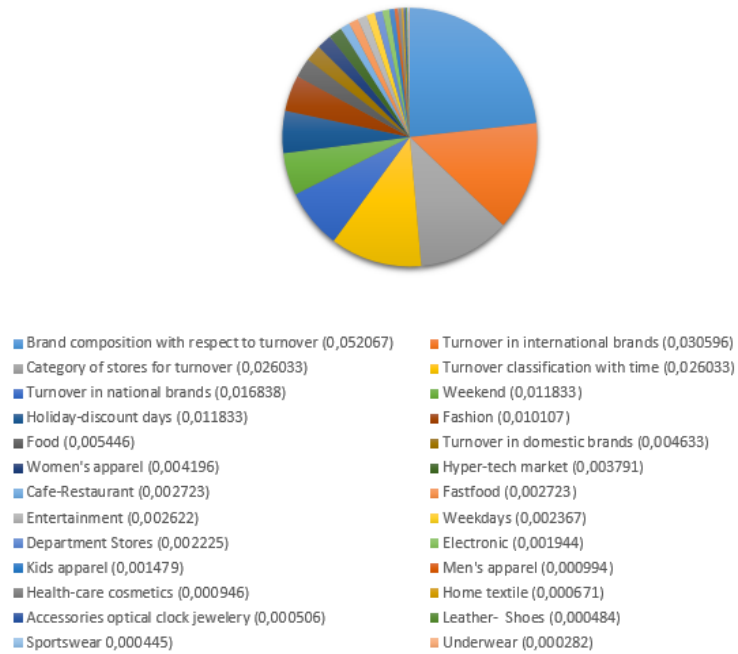
**Figure 12.** Weights of sub-criteria of tenant performance index



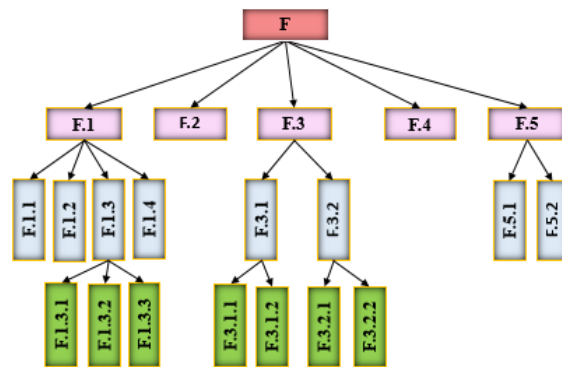
**Figure 13.** Hierarchical structure of mall turnover performance index



**Weights Of Mall Turnover Performance Criterias**

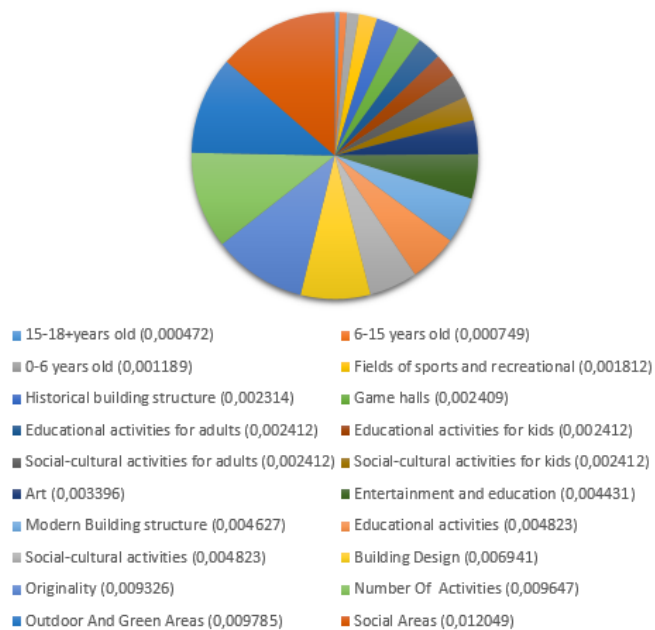


**Figure 14.** Weights of sub-criteria of mall turnover performance index



**Figure 15.** Hierarchical structure of social life performance index

**Weights Of Social life Performance Criterias**



**Figure 16.** Weights of sub-criteria of social life performance index

Figure 14 shows that the most important criteria in terms of turnover in the shopping mall performance is Brand mix (0,052067), which combines national, international and local brands. The other effective criteria are international brands (0,030596), shopping mall category (0,026033), time (0,026033), national brands (0,016838) and fashion (0,010107). Figure 16 reveals that the most important criterion in terms of social life in shopping malls is social areas (0,012049). Other criteria include outdoor and green areas (0,009785), number of activities (0,009647), originality (0,009326) and building design (0,006941).

#### 4. CONCLUSION

The number of shopping centers increases day by day. Factors that affect the development of shopping centers include changes in social structure, consumption habits, rapid urbanization, change in income and education, ease of transformation, accessibility, technological developments, increased interaction with foreign cultures, security concerns, and changing lifestyles [2,25]. As the number of shopping centers increases, competition grows. For this reason, it is more important than ever to make accurate analyses, to be open to innovations, and to develop comprehensively planned projects. Shopping centers that develop themselves with an original and innovative approach are well-managed, provide a space for social life, perceive the needs of the consumer correctly, and develop solutions in this direction come to the forefront in this competition. While a new generation of shopping malls enters the sector, old ones start renovating works according to new needs. Shopping centers are no longer just places to go for shopping; instead, they reflect lifestyle with their architecture, services, and social spaces and activities. Having an original identity, catching the right concept, being properly manageable, and keeping up with new generations, all allow shopping centers to survive in the sector. The model we propose in this study is aimed to determine important concepts for shopping centers and to make a positive contribution to the performance evaluation process provided so far in the literature by obtaining importance weights for each evaluation category or criterion. In the study, we determined primary shopping center performance criteria and asked sector experts to use them for evaluations. The specified criteria were transferred to the Superdecision program we use in the AHP method, and hierarchical structures were thereby created in Figure. (3-5-7-9-11-13-15). The data for the model to which AHP was applied were collected through the survey study. Saaty's 1-9 scale was presented to five experts in the shopping mall sector and they were asked to evaluate the pairwise comparison surveys using shopping malls in Istanbul. In the last step, a single entry was made to the program by taking the geometric mean from all the experts for each pairwise criteria comparison. The aim of this study was to

determine the importance and weights of the criteria for shopping mall performance evaluation using the AHP model and asking sector experts. Alternatives were not indicated in this study because the importance levels of the criteria weights for determined shopping mall alternatives will be shown in a following study using a different method. The results of this study are as follows: We can say that the most important factor of shopping center performance is the Tenants of the shopping center (with a weight of 0,375622). Each main criterion was evaluated. When the sub-criteria of green building [Figure 6] were examined, building management was the most important sub-category (0,005024) followed by marketing (0,002512). The last criteria was the Intelligent building system (0,000570). When the sub criteria of Investor were examined [Figure 8], Brand composition had the highest weight (0,028684) followed by accessibility (0,015536). Figure 12 demonstrates that the most important criteria within tenants is store performance (0,067426) followed by personnel (0,028911). The lowest for the tenants is personnel number, and the education and experience of personnel have the same importance. According to the data on Visitor sub-criteria [Figure 10], Customer satisfaction was the most important (0,031788). The most important sub-criteria for was location (0,014464). The turnover performances date [Figure 14] shows that the most important factor for the turnover criteria affecting shopping mall performances is the brand composition, which combines national, international and domestic brands (0,004633). For its sub-criteria, it can be said that the international brands (0,030596), national brands (0,016838), and fashion (0,010107) are the most significant factors. When the subcriteria of social life (Figure 16) are examined, the most important for shopping mall performance is the social Areas among its sub-criteria with the highest weight (0,012049). The other two sub-criteria were social-cultural and educational social-cultural activities (0,004823), and numbers of these activities come to the forefront. Considering the results, some suggestions are made here. The most important structure in the shopping centers is the tenants. Therefore, in order to boost the performances of shopping centers, the tenants should be pleased by meeting their expectations. The shopping mall administrations, thus, should develop standards of lifestyle in their malls and carry out innovative marketing strategies. Some recycling projects, such as the water purification system, need to be generated and improved. The level of competition among the shopping centers can be increased with diversity in the brands to be formed according to the target customer group, as well as with ease of access and transportation facilities. Within the framework of converting visitor satisfaction into loyalty, findings indicate that criteria such as brand mix, diversity in service and attractiveness of indoor and outdoor design can be used. The experienced and educated people in the management of the malls, product range in stores, and choosing the right location for the malls lead to positive developments in tenant satisfaction and store

performances. Some special strategies need to be generated for international and national brands, on which the turnover factor have the most significant impact, as well as trends, particularly in women's clothing, food, holidays, and weekends. In order to increase the turnovers, social life events such as exhibitions, pop-up days, and so on can be organized in holidays and weekends. Customers' social life can be improved with original, open-enclosed green spaces, social, cultural, and educational events, not only for children but also for adults, workshops, and so on.

## REFERENCES

- [1] Gottdiener M., "*Postmodern Semiotics: Material Culture and The Forms of Postmodern Life*", Cambridge and Oxford: Blackwell, 81-98.
- [2] Ceylan R., "Performance analysis of shopping malls within mixed use real estate projects through a sustainable framework: a methodological proposal for Istanbul case", *MSc. Thesis Yıldız Teknik University Department of City and Regional Planning*, (2016).
- [3] Bajo J., Corchado J.M., Paz Y.D., Paz J.F., Rodriguez S., Martín Q., Abraham A., "Shomas: intelligent guidance and suggestions in shopping centres", *Applied Soft Computing*, 9(2): 851-862, (2009).
- [4] Cengiz E. and Özden B., "A study aimed at identifying the major shopping centers and consumers' attitudes with large shopping in retailing", *Ege University Faculty of Economics and Administrative Sciences*, 2(1): 65-78, (2002).
- [5] Köksal Y. and Aydın E.E., "A Comparative Investigation On Shopping Mall Perception Of Consumers: The Case Of Lakes Area", *Int. Journal of Management Economics and Business*, 11(24): 231-248, (2015).
- [6] Reynolds K. E., Ganesh J. and Luckett, M., "Traditional malls vs. factory outlets: comparing shopper typologies and implications for retail strategy", *Journal of Business Research*, 55(9): 687-696, (2002).
- [7] Zacharias J., Schinazi V., "The impact of an entertainment retrofit on the performance of shopping center", *Journal Of Shopping Center Research*, 29-44, (2003).
- [8] İbicioğlu H., "Shopping centers: an investigation on demographic effect and customer attitudes", Süleyman Demirel University *Journal of Faculty of Economics and Administrative Sciences*, 10(1): 43-55, (2005).
- [9] Akat,Ö., Taşkın Ç. and Özdem A., "Buying behaviour of international shopping center consumers: an application in Bursa", *Journal of Anadolu University Social Sciences* 2: 13-30.
- [10] Yiu C., Yau Y., "An ecological framework for the strategic positioning of a shopping mall", *Journal of Retail & Leisure Property*, 5(4): 270-280, (2005).
- [11] Ngai K.L., "The determinants of shopping centre performance: a regressive-expert system", *Ph.D Dissertation University of Hong Kong*, (2007).
- [12] Morrison M., Gan S., Dubelaar C. and Oppewal H., "In-store music and aroma influences on shopper behavior and satisfaction", *Journal of Business Research*, (2010).
- [13] Yavetz V., Iris., Gilboa S., "The effect of service scape cleanliness on customer reaction", *Services marketing quarterly*, 31(2): 213-234, (2010).
- [14] Reikli M., "The key of success in shopping centers: composing elements of shopping centers and their strategic fit", *Ph.D Dissertation, Corvinus University of Budapest*, (2012).
- [15] Haj-Salem N., Chebat J.C., Michon R. and Oliveira S., "Why male and female shoppers do not see mall loyalty through the same lens? the mediating role of self-congruity", *Journal of Business Research*, 69(3): 1219-1227, (2016).
- [16] Mittal A. and Jhamb D., "Determinants of shopping mall attractiveness: the indian context", *Procedia Economics and Finance*, 37(16): 386-390, (2016).
- [17] Anselmsson J., "Effects of shopping centre re-investments and improvements on sales and visit growth", *Journal of Retailing and Consumer Services*, 32:139-150, (2016).
- [18] El-Abda W., Kamelb B., Afifya M. and Dorraa M., "Assessment of skylight design configurations on daylighting performance in shopping malls: a case study", *Solar Energy*, 170: 358-368, (2018).
- [19] Dey P.K., "Managing project risk using combined analytic hierarchy process and risk map", *Applied Soft Computing*, 10(4): 990-1000, (2010).
- [20] Myers J. H. and Mark I. A., "Determinant Buying Attitudes: Meaning and Measurement", *Journal of Marketing*, 32: 13-20, (1968).
- [21] Srdjevic B. and Srdjevic, Z., "Synthesis of individual best local priority vectors in AHP-group decision making", *Applied Soft Computing*, 13: 2045-2056, (2013).
- [22] Saaty T.L., "Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process", *Management Science*, 32(7): 841-855, (1986).
- [23] Saaty T.L., "How to make a decision: the analytic hierarchy process", *European Journal of Operational Research* 48 (1): 9-26, (1990).
- [24] Saaty T.L., "The analytic hierarchy and analytic network measurement processes: applications to decisions under risk", *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, 1(1): 125, (2008).
- [25] Erkip F. and Özöduru B., "Retail development in turkey: an account after two decades of shopping malls in the urban scene", *Propla*, 391: 33, (2015).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Borlanmış % 5 Mg katkılı Ni-Mg alaşımının yüzey özelliklerinin incelenmesi

## *Investigation of surface properties of boronized Ni-Mg alloy added 5% Mg*

Yazar(lar) (Author(s)): İsmail YILDIZ<sup>1</sup>, İbrahim GÜNEŞ<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-9207-591X

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-7595-0121

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Yıldız İ. ve Güneş İ., “Borlanmış % 5 Mg katkılı Ni-Mg alaşımının yüzey özelliklerinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 97-104, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.512600

# Borlanmış % 5 Mg Katkılı Ni-Mg Alaşımının Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

İsmail YILDIZ<sup>1\*</sup>, İbrahim GÜNEŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İscehisar Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 14.01.2019 ; Kabul/Accepted : 04.03.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, % 95 Ni ve % 5 Mg içeren Ni-Mg alaşımının borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Alaşım malzemesini üretmek için toz metalurjisi yöntemiyle Ni ve Mg metal tozları uygun kaplar içerisinde homojen bir şekilde karışması için tek faza sahip elektrik motorlu döner bir karıştırıcıda 24 saat süreyle karıştırılmıştır. Karıştırılan tozlar özel olarak tasarlanmış silindirik kalıplara dökülerek 300 bar basınç altında preslendikten sonra Ar atmosferi ortamında tüp fırın içerisinde 530 °C sıcaklıkta sinterleme işlemine tabi tutulmuşlardır. Sinterlenerek üretilen numunelere sırasıyla sertlik ve yoğunluk testleri uygulanmıştır. Ayrıca, sinterlenerek üretilmiş numunelere kapalı fırın ortamında 900 ve 1000 °C sıcaklıklarda 1.5 – 4.5 saat sürelerde ticari Ekabor tozu kullanılarak borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Borlanan numunelerin borür tabaka kalınlıkları optik mikroskop yardımıyla ölçülmüştür. Borlama işlemi sonucunda elde edilen borür fazları XRD analizi ile belirlenmiştir. Borlanmış Nikel-Magnezyum numunelerinin XRD analizi sonucunda Ni<sub>3</sub>B, Ni<sub>2</sub>B, NiB ve Mg fazları elde edilmiştir. Artan borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak elde edilen Ni-Mg numuneler üzerinde farklı kalınlıklarda borür tabakaları ölçülmüştür. Mg içeriğinin borlama olayına yardımcı olması ve borür tabakalarının büyümesine etki etmesinin dışında mikroyapıda gözenekli bir yapı oluşmasına neden olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Nikel, Mg, borür tabakası, mikroyapı, fazlar.

## Investigation of Surface Properties of Boronized Ni-Mg Alloy added 5% Mg

### ABSTRACT

In this study, Boronation of Ni-Mg alloy containing 95% Ni and 5% Mg was carried out. In order to produce the alloy material, Ni and Mg metal powders were mixed in a single-phase powder mixer for 24 hours to mix homogeneously in suitable containers by powder metallurgy method. Mixed powders were poured into specially designed cylindrical molds and pressed under 300 bar pressure and then sintered at 530 °C in tube furnace under Ar atmosphere. The samples produced by sintering were subjected to hardness and density tests respectively. In addition, sintered samples were made by using commercial Ekabor powder at a temperature of 900 and 1000 °C for 1.5-4.5 hours. The boride layer thickness of the boronized samples was measured by means of an optical microscope. Boron phases were determined by XRD analysis. Boronized Nickel-Magnesium samples yielded Ni<sub>3</sub>B, Ni<sub>2</sub>B, NiB and Mg phases as a result of XRD analysis. The boride layers with different thicknesses were measured on the Ni-Mg samples obtained depending on the increasing boring temperature and time. It has caused a porous structure in microstructure in addition to the fact that Mg content helps to boron and affects the growth of boride layers.

**Keywords:** Nickel, Mg, boride layer, microstructure, phases.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Borlama, malzeme yüzeylerinde sert bor tabakaları oluşturmak için ana malzeme yüzeyine bor atomlarının difüzyonunu içine alan termokimyasal bir difüzyon işlemidir [1-4]. Yani borlama işlemi, bor atomlarının metalik malzemelerin yüzeyinden içeriye doğru difüzyonu ile gerçekleşmektedir. Borlama sonucu malzeme yüzeyinin yüksek sertlik, yüksek aşınma ve korozyon direnci gibi özellikler kazandığı belirlenmiştir. Bütün bu olumlu özelliklere karşın, borlamanın tek dezavantajı borlanmış tabakanın sertliğinden dolayı kırılabilir olmasıdır [5-7].

Son yıllarda, mekanik alaşımlama (MA) yöntemi vasıtasıyla hazırlanan bazı amorf Mg-Ni alaşımlarının oda sıcaklığında büyük miktarda hidrojen emebileceği ve deşifre edebileceği sonucuna varıldı [8-10]. Mekanik alaşımlama, elektrokimyasal testler sırasında büyük bir boşaltma kapasitesine ve yüzey aktivitesine sahiptir [11-13]. Ancak, zayıf döngüsel performans, düşük döngüsel yaşam gibi etkenler bu alaşımların birçoğunu ticari bataryalarda kullanımlarını engellemiştir [14,15].

Bor tabakası oluşumu borlamanın yapıldığı sıcaklığa, gerçekleştirilen işlem zamanına ve borlanan malzemenin özelliklerine bağlıdır. Borlama yönteminde bor atomlarının sıcaklıkla malzeme yüzeyinde difüzyonu sonucunda, malzemenin dış yüzeyinde (üst tarafta) borür tabakası, onun altında geçiş bölgesi, en altta da ana yapı (matris) oluşmaktadır [16,17].

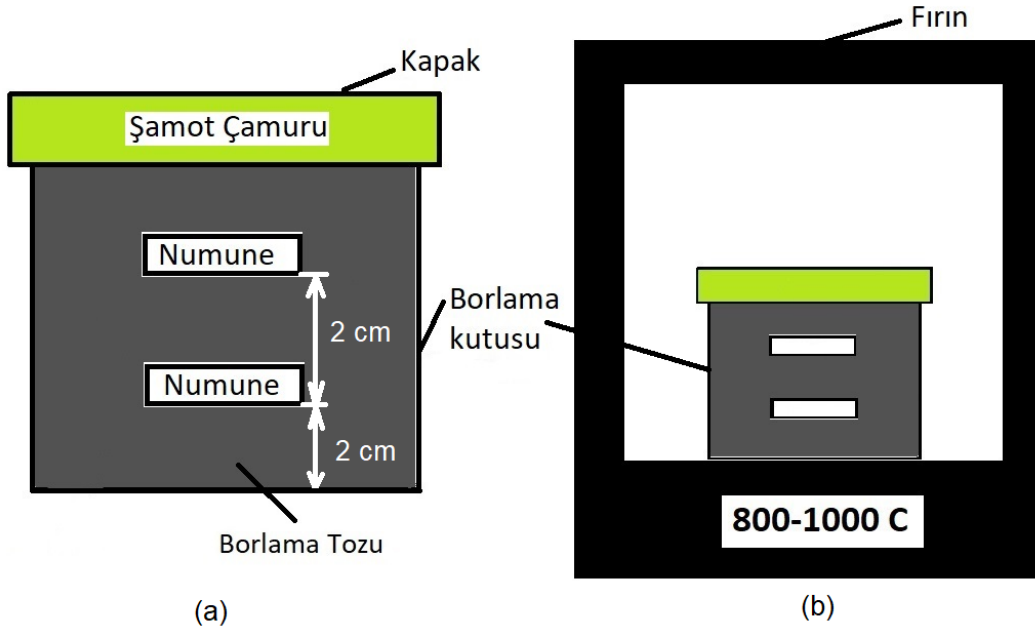
\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : iyildiz@aku.edu.tr

Borlama genel olarak çelikler, dökme demirler, nikel, kobalt, titanyum, molibden esaslı alaşımlar ile sinterlenmiş karbür gibi birçok demir esaslı ve demir dışı metallere başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Borlama malzeme niteliğine göre 700-1100 °C sıcaklık aralıklarında, yaklaşık olarak 1-12 saat süre ile katı, sıvı, gaz veya plazma ortamında gerçekleşmektedir [18-20]. Bu konuda daha önce literatürde çalışma yapılmamıştır. Çalışmanın amacı, Ni elementi ile Mg elementinin alaşım yaparak borlanabilirlik yönü ve alaşım içerisinde nasıl bir yapı oluşturacağını araştırmaktır. Literatürde de Mg'un toz metalürjisinde oksitlenme ve genişleme özellikleri gösterdiği için bu elementin kullanımının zor olduğu anlaşılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada, % 95 Ni ile % 5 Mg alaşımlarının sinterleme yöntemiyle üretimi yapılmıştır. Uygun kaplar içerisinde konulan numunelerin üst ve alt taraflarına ticari Ekabor II tozu konularak fırın atmosferinde farklı sıcaklık aralıkları uygulanarak borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı sonucu borür tabaka kalınlıkları ölçülmüş, oluşan fazlar belirlenmiş ve borlama işleminin gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Sonuçlar literatürle karşılaştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada, % 95 Ni-% 5 Mg alaşım malzemelerini elde etmek için % 99 saflığa sahip Ni ve Mg metal tozları kullanılmıştır. Ni-Mg metalik tozların sinterleme sonrasında tane yapılarının iyi bir şekilde yapışması için tozlar tek fazlı karıştırıcıda 24 saat süreyle karıştırma işlemi yapılmıştır. Birbiriye karışan tozlar, dairesel şekle sahip olmaları için özel olarak tasarlanmış soğuk kalıba dökülerek tek eksenli preste yaklaşık 300 bar basınç altında preslenmiştir. Preslenerek elde edilen numunelerin dayanımlarını arttırmak için koruyucu atmosferik ortama sahip tüp fırında 530 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle sinterleme işlemi uygulanmıştır.

Sinterlenerek elde edilen numunelere borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Borlama işleminde, özel olarak hazırlanmış kare ya da dikdörtgen bir kap kullanılmaktadır. Kabin içerisine numunelerin altına ve üzerine ticari Ekabor II toz karışımları dökülmüştür. Kabin üzeri ve kapağı şamot çamuru ile hava almayacak şekilde kapatılmıştır. Fırın ortamında 900 ve 1000 °C sıcaklıklarda 1,5 ve 4,5 saat süre aralığında ısıtmaya tabi tutulmuşlardır. Bu süreler sonrasında numuneler fırından çıkarılarak soğumaya bırakılmıştır (Şekil 1).



**Şekil 1.** Fırın içerisinde borlama işleminin yapılışı (a: Numune kutusunun hazırlanması, b: Numunenin fırınlanması) (Boronizing of process in the furnace) (a: Preparation of sample box, b: Firing of sample)

Borlanan numunelere yüzey pürüzlülük, yoğunluk, mikro sertlik, mikroyapı testlerinin yanı sıra XRD analizi uygulanmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümü Profilometre yardımıyla yapılmıştır. Farklı ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Yoğunluk,  $d=m/v$  formülüne göre hesaplanmıştır. Burada m, sinterlenmiş numunenin kütlesi; v, sinterlenmiş numunenin hacmi olarak belirlenmiştir. Mikrosertlik testinde her bir numunede 5 farklı ölçüm yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Mikroyapı testinde yüzeyde oluşan bor tabaka görüntüsü ve kalınlık ölçümü Nikon SMZ1000 marka optik mikroskopla

yapılmış ve görüntüler Clemex kamera ile ortaya çıkarılmıştır. Görüntü almadan önce borlanmış numuneler kesit bölgelerinden kesilerek kalıplara alınmış ve sırasıyla çeşitli boyutlardaki zımpara kağıtlarıyla zımparalanmıştır. Bu işlem sonrasında Alümina ile parlatılan numunelere Nital dağılayıcı uygulanarak tabaka bölgeleri elde edilmiştir.

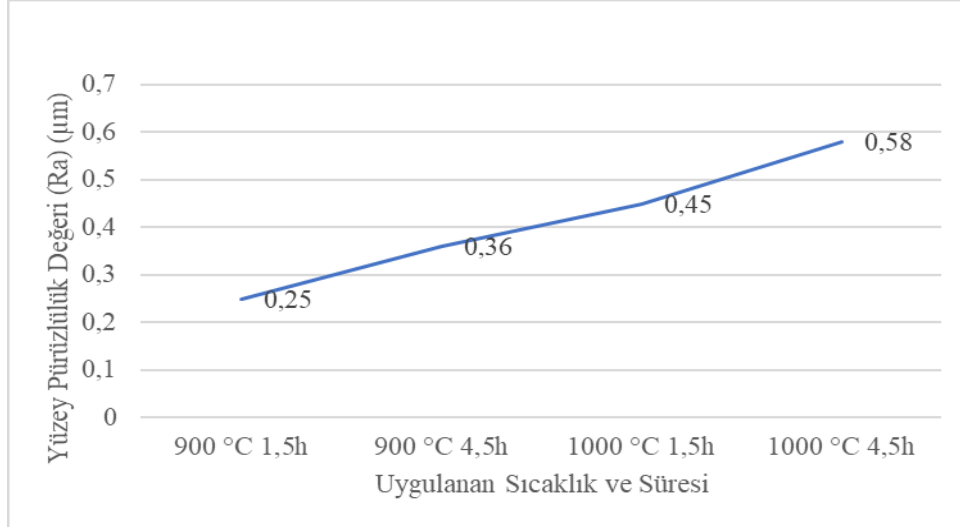
XRD analizinde, X-Işını olarak Cu K (alpha) tercih edilmiştir. Tarama hızı 0,02 °/dk ve tarama açısı ise 2 Theta olacak şekilde yapılmıştır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS and DISCUSSION)

#### 3.1. YüzeY Pürüzlülüğü (Surface Roughness)

Numunelere yüzeY pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerin ortalamaları ( $R_a$ )

almıştır. Ölçüm neticesinde yüzeY pürüzlülük değerlerinin 0.25 ile 0.58 arasında değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 2).



**Şekil 2.** 900 ve 1000 °C sıcaklıklarda borlanmış numunelerde ölçülen yüzeY pürüzlülük değerleri (Surface roughness values measured in boronized samples at temperatures of 900 and 1000 °C)

YüzeY pürüzlülüğünün artmasıyla difüzyon alanı artış göstermiş ve buna bağılı olarak bor tabaka kalınlıkları da artmıştır. Borlama süre ve sıcaklığı bunun temel nedenidir.

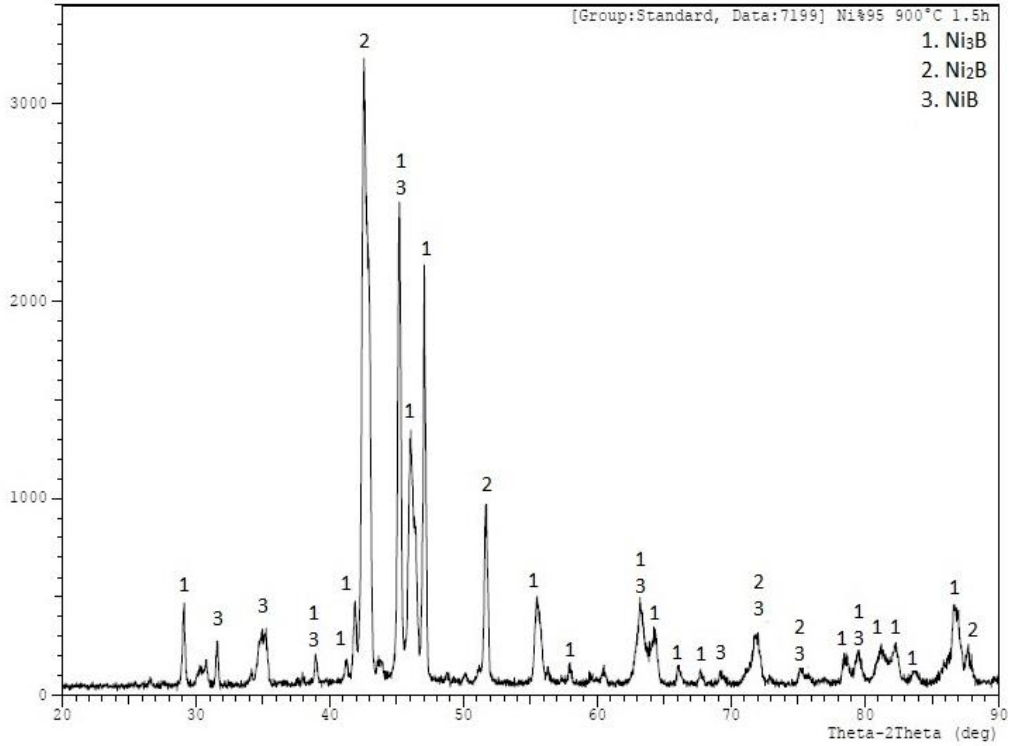
#### 3.2. Yoğunluk (Density)

Sinterleme sonrasında elde edilen numunelerin %95 Ni ve %5 Mg içeren numunenin yoğunluğu 4,78 gr/cm<sup>3</sup> bulunmuştur.

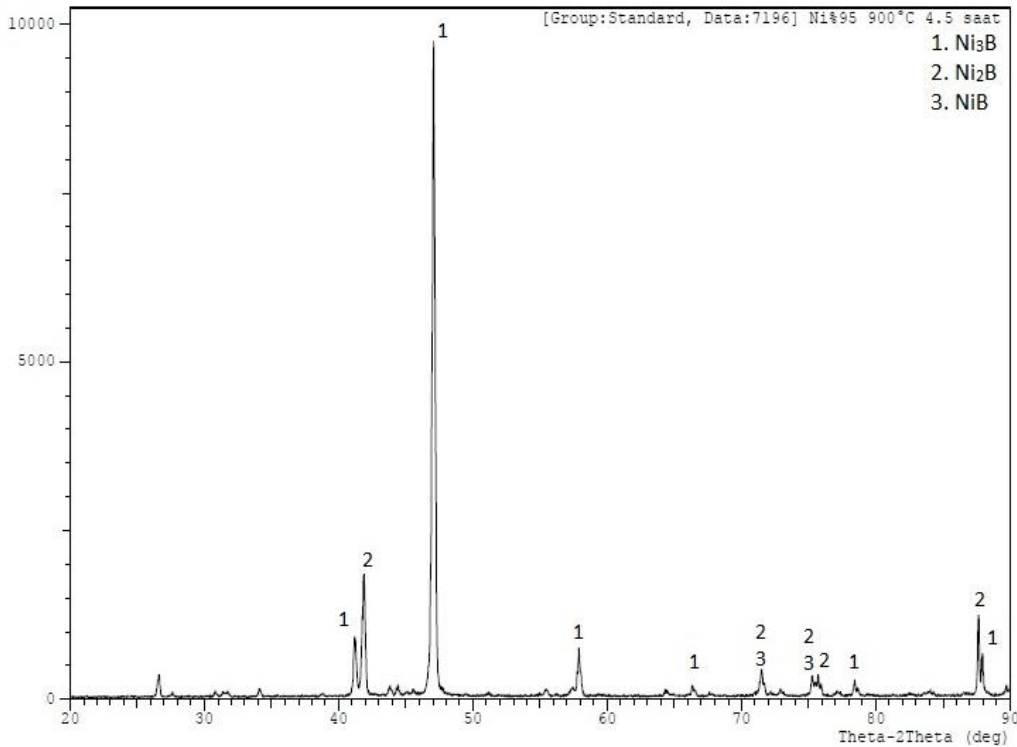
#### 3.3 XRD Analizi (XRD Analysis)

Şekil 3 ve 4'te 900 °C sıcaklıkta 1,5 ve 4,5 saat sürede Ni %95-Mg %5 kompozisyonuna yapılan XRD analiz sonuçları görülmektedir. Sonuçlarda en yüksek faz değerlerine Ni<sub>2</sub>B ve Ni<sub>3</sub>B pikleri sahiptir. Bu faz değerlerini takiben NiB değeri gözlemlenmiştir. 900 °C sıcaklık ve 4,5 saat süre sonrası borlanan numunede Ni<sub>3</sub>B faz değeri 4000 değerden 10000 değerlerine yükselmiştir. Bu değerdeki artış bile borlamanın olduğunu göstermektedir. Literatürde yüksek oranda Nikel elementi içeren alaşımların borlanması üzerine çok az sayıda çalışma bulunmaktadır [6-8,21,22]. Mg

elementinin etkisi ise hiç araştırılmamıştır. Literatürdeki çalışmalarda XRD analizlerinde genellikle daha baskın NiB fazı elde edilirken, bu çalışmada Ni<sub>3</sub>B ve Ni<sub>2</sub>B fazlarının diğere fazlara (NiB, Ni<sub>3</sub>B<sub>4</sub>) oranla daha baskın olduğu görülmüştür. Elde edilen Ni<sub>3</sub>B ve Ni<sub>2</sub>B fazlarının NiB fazına göre göre daha tok bir yapıda olduğu bilinmektedir [8,21]. Ueda vd arkadaşlarının yaptıkları çalışmada [21], XRD analizi sonucu Ni<sub>3</sub>B, Ni<sub>2</sub>B ve NiB pik değerlerini elde etmişlerdir. Ni<sub>3</sub>B faz değerini ortalama 5000 olarak bulmuşlardır. Şekil 5 ve 6'da 1000 °C sıcaklıkta 1,5 ve 4,5 saat sürede borlanmış Ni %95 Mg %5 kompozisyonuna yapılan XRD analiz sonuçları görülmektedir. Bu sonuçlarda ise, 5000-5500 pik değeri elde edilmiştir. Gunes vd. %99 saflığında Nikel elementini 850-950 °C'de 2 ve 6 saat süresince kutu borlama yapmışlar ve NiB, Ni<sub>2</sub>B, Ni<sub>3</sub>B, Ni<sub>4</sub>B<sub>3</sub> pik sonuçlarını bulmuşlardır [6]. Anthymidis vd. arkadaşlarının yaptıkları çalışmada [22], Ni<sub>3</sub>B ve Ni<sub>2</sub>B faz değerlerini bulmuşlardır. Gerçekleştirilen çalışmada, Ni<sub>3</sub>B ve Ni<sub>2</sub>B faz değeri sonuçları Nikel ile borlamanın gerçekleştiğini göstermektedir.

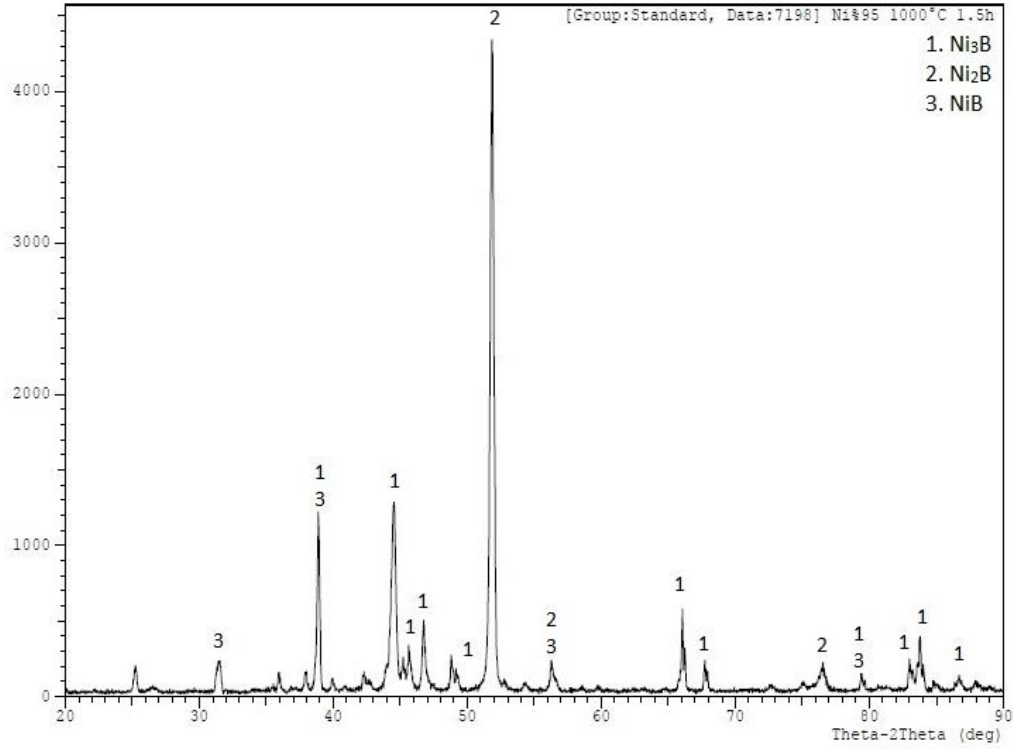


**Şekil 3.** Ni %95-Mg % 5 kompozisyonuna 900 °C sıcaklıkta 1,5 saat sürede gerçekleşen borlama işlemi sonrası yapılan XRD analiz sonucu (XRD analysis performed after boronizing process which was carried out at temperature of 900 °C and 1,5 hours to Ni %95-Mg % 5 composition)

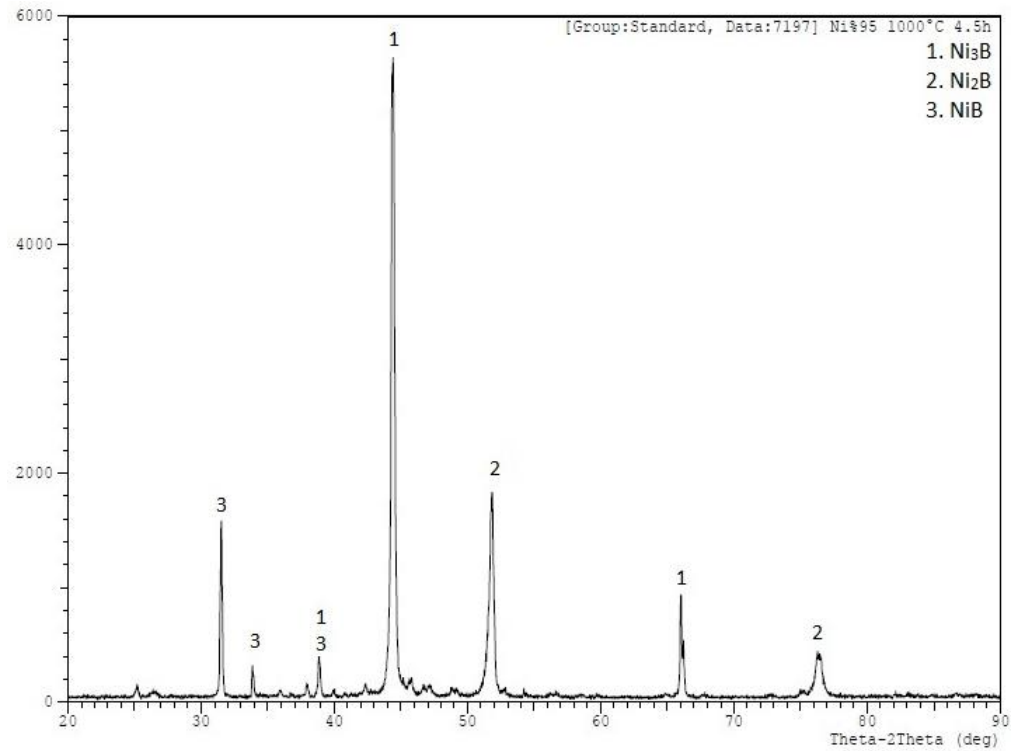


**Şekil 4.** Ni %95-Mg % 5 kompozisyonuna 900 °C sıcaklıkta 4,5 saat sürede gerçekleşen borlama işlemi sonrası yapılan XRD analiz sonucu (XRD analysis performed after boronizing process which was carried out at temperature of 900 °C and 4,5 hours to Ni %95-Mg % 5 composition)



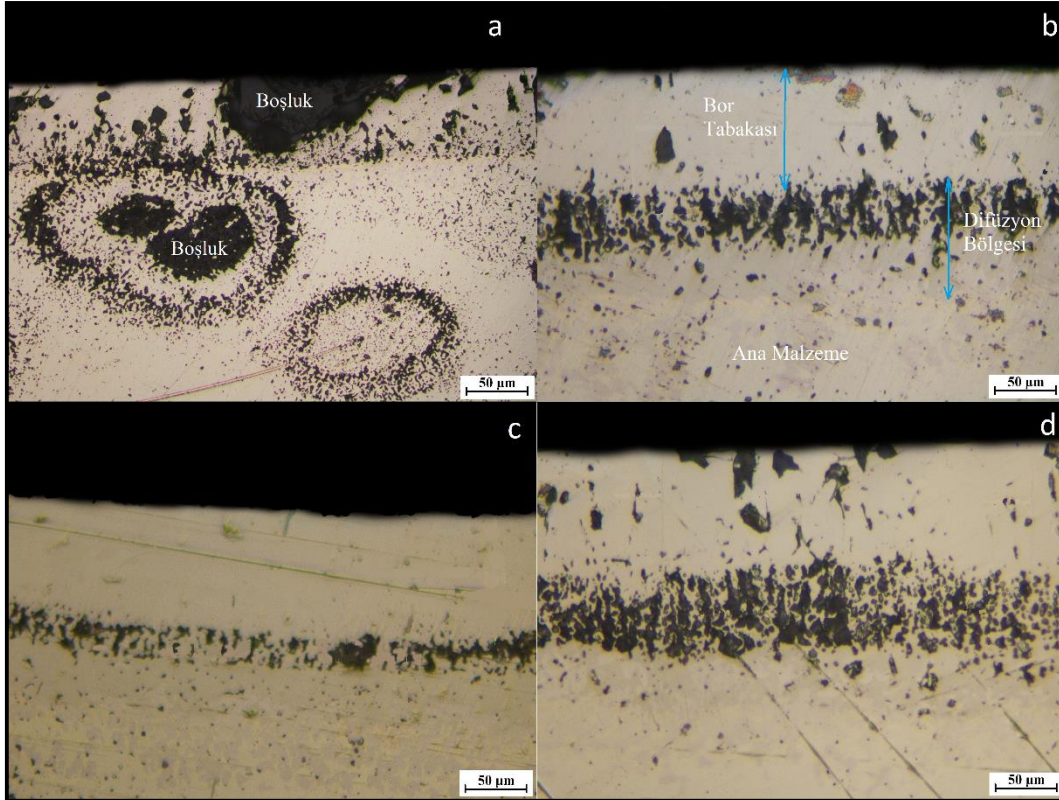


**Şekil 5.** Ni %95-Mg % 5 kompozisyonuna 1000 °C sıcaklıkta 1,5 saat sürede gerçekleşen borlama işlemi sonrası yapılan XRD analiz sonucu (XRD analysis performed after boronizing process which was carried out at temperature of 1000 °C and 1,5 hours to Ni %95-Mg % 5 composition)



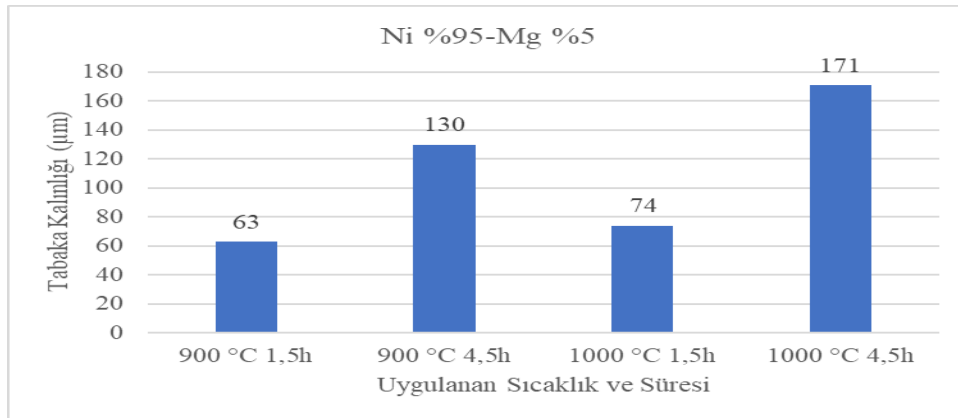
**Şekil 6.** Ni %95-Mg % 5 kompozisyonuna 1000 °C sıcaklıkta 4,5 saat sürede gerçekleşen borlama işlemi sonrası yapılan XRD analiz sonucu (XRD analysis performed after boronizing process which was carried out at temperature of 1000 °C and 4,5 hours to Ni %95-Mg % 5 composition)

### 3.4 Mikroyapı (Microstructure)



**Şekil 7.** Borlanmış % 95 Ni ile % 5 Mg alaşımının mikroyapı görüntüleri (a: 900 °C 1,5 saat, b: 900 °C 4,5 saat, c: 1000 °C 1,5 saat, d: 1000 °C 4,5 saat) (Microstructure images of boronized 95% Ni and 5% Mg alloy) (a: 900 °C 1,5 hour, b: 900 °C 4,5 hour, c: 1000 °C 1,5 hour, d: 1000 °C 4,5 hour)

Şekil7’de 900 ve 1000 °C



**Şekil 8.** 900 ve 1000 °C sıcaklıklarda borlanmış numunelerde ölçülen bor tabaka kalınlıkları (Boron layer thicknesses measured at borided samples at temperatures of 900 and 1000 °C)

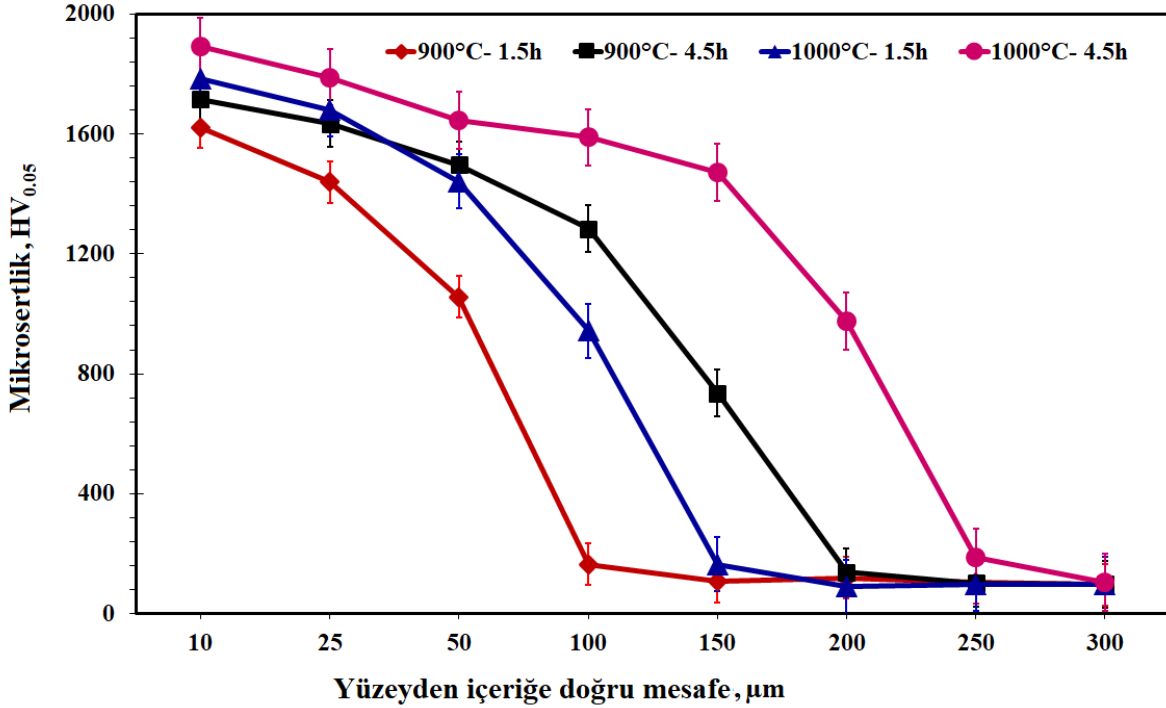
sıcaklıklarda borlanmış % 95 Ni ile % 5 Mg alaşımlarının mikroyapı görüntüleri görülmektedir. Borlama sıcaklığı ve sürelerinin artmasına bağlı olarak borür tabaka kalınlığı ve difüzyon bölgeleri çok belirgin bir şekilde gözükmemektedir. Tabaka kalınlıkları elde edilen görüntüler neticesinde ölçülmüştür (Şekil 8). Görüntüler incelendiğinde sıcaklık ve süre artışına bağlı olarak bor tabaka kalınlıkları artsa da bor tabakasının ve difüzyon

bölgesinin bozulmamasından dolayı 900 °C en iyi bor sıcaklığı olarak tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda XRD piklerinde Mg gözlemlenmiştir. Borür tabakası ile matris arasındaki geçiş bölgesinde Mg elementine bağlı olarak gözenekli (boşluklu) bir yapı oluşmuştur. Bu durum, Mg’un düşük ergime derecesi, borlama işlem sıcaklığının ise yüksek olmasından dolayı ortaya çıkmıştır.

### 3.5. Mikrosertlik (Microhardness)

Şekil 9'da, borlanmış % 95 Ni ile % 5 Mg alaşımının mikrosertlik değerleri görülmektedir. Borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla sertlik değerlerinde artışlar elde edilmiştir. 900 °C ve 1000 °C'de 1.5 ve 4.5 saat süreyle borlanmış numunelerde sırasıyla, 1615±28 HV<sub>0.05</sub>, 1728±37 HV<sub>0.05</sub>, 1795±56 HV<sub>0.05</sub> ve 1864±70 HV<sub>0.05</sub>

sertlik değerleri elde edilmiştir. En yüksek sertlik değeri 1000 °C'de 4.5 saat süre sonrasında borlanmış numunede elde edilirken en düşük sertlik değeri 900 °C'de 1.5 saat süre sonrasında elde edilmiştir. Borlanmamış numunenin sertliği ise, 124 HV<sub>0.05</sub> olarak tespit edilmiştir. Borlama işlemi % 95 Ni ile % 5 Mg alaşımının sertlik değerinde önemli derecede artış sağlamıştır.



Şekil 9. Borlanmış % 95 Ni ile % 5 Mg alaşımının mikrosertlik değerleri (Microhardness values of boronized 95% Ni and 5% Mg alloy)

## 4. SONUÇLAR (RESULTS)

- 900 ve 1000 °C'de 1,5-4,5 saat süreyle borlama deneyi sonucunda sırasıyla, 63 µm, 130 µm, 74 µm ve 171 µm kalınlıklarında borür tabakaları elde edilmiştir.
- Borlama sonrasında numunelere XRD analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda Ni<sub>2</sub>B, Ni<sub>3</sub>B, NiB ve Mg faz değerleri ortaya çıkmıştır.
- %95 Ni ve %5 Mg içeren numunelerin yoğunluğu 4,78 gr/cm<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir.
- Sinterleme sonrasında elde edilen numunelerin yüzey pürüzlülük ölçüm neticesinde değerlerinin 0.25 ile 0.58 arasında değiştiği tespit edilmiştir.
- Sinterleme sonucunda malzemelerde 124±9 HV<sub>0.05</sub> sertlik değeri elde edilmiştir.
- 900 °C ve 1000 °C'de 1.5 ve 4.5 saat süreyle borlanmış numunelerde sırasıyla, 1615±28 HV<sub>0.05</sub>, 1728±37 HV<sub>0.05</sub>, 1795±56 HV<sub>0.05</sub> ve 1864±70 HV<sub>0.05</sub> sertlik değerleri elde edilmiştir.
- Borlama sonrasında en yüksek sertlik değeri 1000 °C'de 4.5 saat süre borlanmış numunede elde edilirken, en düşük sertlik değeri ise 900 °C'de 1.5 saat sürede borlanmış numunede elde edilmiştir.

- Uygulanan borlama işleminde sıcaklık ve süre artışına bağlı olarak borür tabaka kalınlıklarında artışlar olmuştur. Buna karşın bor tabakasının ve difüzyon bölgesinin bozulmasından dolayı en iyi bor sıcaklığı 900 °C olarak gözlemlenmiştir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Gerçekleştirilen bu çalışma, Afyon Kocatepe Üniversitesi BAPK 17.MYO.05 no'lu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonuna çok teşekkürler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sen S., Sen U. and Bindal C., "The growth kinetics of borides formed on boronized AISI 4140 steel", *Vacuum*, 77: 195-202, (2005).
- [2] Keddamm M., Kulka M., Makuch N., Pertek A. and Măldzinski L., "A kinetic model for estimating the boron activation energies in the FeB and Fe<sub>2</sub>B layers during the gas-boriding of Armco iron: Effect of boride incubation times", *Applied Surface Science*, 298: 155-163, (2014).
- [3] Makuch N. and Kulka M., "Microstructural characterization and some mechanical properties of gas-

- borided Inconel 600-alloy”, *Applied Surface Science*, 314: 1007-1018, (2014).
- [4] Kulka M., Dziarski P., Makuch N., Piasecki A. and Miklaszewski A., “Microstructure and properties of laser-borided Inconel 600-alloy”, *Applied Surface Science*, 284: 757-771, (2013).
- [5] Yıldız I., Gunes I. and Ulker Ş., “Borlanmış Fe-Mg Alaşımının Aşınma Davranışının İncelenmesi”, *Ist International Symposium on Light Alloys and Composite Materials*, Karabük, 138-141, (2018).
- [6] Gunes I., Keddami M., Chegroune R. and Ozcatil M., “Growth kinetics of boride layers formed on 99.0% purity Nickel”, *Bulletin of Materials Science*, 38: 1113-1118, (2015).
- [7] Sista V., Kahvecioğlu O., Kartal G., Zeng Q. Z., Kim J.H., Eryılmaz O. L. and Erdemir A., “Evaluation of electrochemical boriding of Inconel 600”, *Surface & Coatings Technology*, 215: 452-459, (2013).
- [8] Ağaoğlu G. H. and Orhan G., “Elaboration and electrochemical characterization of MgNi hydrogen storage alloy electrodes for Ni/MH batteries”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 8098-8108, (2017).
- [9] Gajdics M., Calizzi M., Pasquini L., Schafler, E. and Revesz A., “Characterization of a nanocrystalline MgNi alloy processed by high-pressure torsion during hydrogenation and dehydrogenation”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41: 9803-9809, (2016).
- [10] Tran X. Q., McDonald S. D., Gu Q. F. and Nogita K., “In-situ synchrotron X-ray diffraction investigation of the hydriding and dehydriding properties of a cast Mg-Ni alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 636: 249-256, (2015).
- [11] Oh S., Kim M., Eom K., Kyung J., Kim D., Cho E. and Kwon H., “Design of MgNi alloys for fast hydrogen generation from seawater and their application in polymer electrolyte membrane fuel cells”, 41: 5296-5303, (2016).
- [12] Knotek V., Ekrt O. and Vojtech D., “Electrochemical hydriding of MgNi alloys compacted by spark plasma sintering”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 23908-23914, (2017).
- [13] Santos S. F., de Castro J. F. R., Ishikawa T. T. and Ticianelli E. A., “Effect of transition metal additions on the electrochemical properties of a MgNi-based alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 434-435: 756-759, (2007).
- [14] Fu H., Wu W., Dou Y., Liu B., Li H. and Peng Q., “Hydrogen diffusion kinetics and structural integrity of superhigh pressure Mg-5 wt%Ni alloys with dendrite interface”, *Journal of Power Sources*, 320: 212-221, (2016).
- [15] Meyer M., Mendoza-Ze’lis L., “Hydrogen diffusion kinetics and structural integrity of superhigh pressure Mg-5 wt%Ni alloys with dendrite interface”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37: 14864-14869, (2012).
- [16] Gunes I. and Ulker Ş., “Investigation of tribological properties of boride layers formed on 99.0% purity nickel”, *Journal of the Balkan Tribological Association*, 4: 3703-3713, (2016).
- [17] Gunes I. and Yıldız I., “Investigation of Adhesion and Tribological Behavior of Borided AISI 310 Stainless Steel”, *Revista Materia*, 21: 61-71, (2016).
- [18] Ortiz-Domínguez M., Keddami M., Elias-Espinosa M., Ramírez-Cardona M., Arenas-Flores A., Zuno-Silva J., Cervantes-Sodi F. and Cardoso-Legorret E., “Characterization and boriding kinetics of AISI T1 steel”, *Metallurgical Research Technology*, 116: 102-113, (2019).
- [19] Barkat A., Hammou A. D. and Allaoui O., “Effect of Boriding on the Fatigue Resistance of C20 Carbon Steel”, *Acta Physica Polonica A*, 132: 813-815, (2017).
- [20] Shchukin V. G. and Marusin V.V., “Induction boriding of steels”, *Inorganic Materials: Applied Research*, 6: 382-387, (2015).
- [21] Ueda N., Mizukoshia T., Demizua K., Sonea T., Ikenaga A., Kawamoto M., “Boriding of Nickel By The Powder-Pack Method”, *Surface and Coatings Technology*, 126: 25-30, (2000).
- [22] Anthymidis K. G., Zinoviadis P., Roussos D., Tsipias D. N., “Boriding of Nickel in a Fluidized Bed Reactor”, *Material Research Bulletin*, 37: 515-522, (2002).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Kullanılmış Ni-Mo hidrosülfürizasyon katalizöründen nikel okzalat dihidrat üretimi

## *Production of nickel oxalate dihydrate from spent Ni-Mo hydrodesulfurization catalyst*

Yazar(lar) (Author(s)): Sedat İLHAN

ORCID: 0000-00001-9976-0955

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** İlhan S., “Kullanılmış Ni-Mo hidrosülfürizasyon katalizöründen nikel okzalat dihidrat üretimi”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 105-110, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.523668

# Kullanılmış Ni-Mo Hidrodesülfürizasyon Katalizöründen Nikel Okzalat Dihidrat Üretimi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Sedat İLHAN\*

Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Türkiye

(Geliş/Received : 07.02.2019 ; Kabul/Accepted : 04.03.2019)

## ÖZ

Kullanılmış Ni-Mo HDS katalizörü, değerli metallerin geri kazanımı için önemli ikincil kaynaklardan biridir. Geri kazanım prosesleri hem çevresel hem de ekonomik açıdan önem arz etmektedir. Oksitleyici kavurma sonrasında Ni-Mo HDS katalizörünün % 5.27 Ni içerdiği belirlenmiştir. Bu çalışmada oksitleyici kavurmaya tabi tutulan Ni-Mo HDS katalizöründen okzalik asitli çözeltilerde  $\text{NiC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  üretimi incelenmiştir. ICP-OES analizinden çözeltideki nikel konsantrasyonunun deneyin başında arttığı, bir maksimum değere ulaştıktan sonra azalmaya başladığı görülmüştür.  $\text{NiC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 'ın iki adımda konsekütif reaksiyon sonucunda oluştuğu tespit edilmiştir. 1/10 katı/sıvı oranı ile 40 °C sıcaklık, 1 M okzalik asit çözeltisi, 300 rpm karıştırma hızı kullanılarak 480 dakika süre ile gerçekleştirilen deney sonucunda % 99.1 verimle  $\text{NiC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  üretilmiştir. Kuru hava atmosferinde gerçekleştirilen TG-DTA analizi, üretilen  $\text{NiC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 'ın iki kademede bozunduğunu ve 350 °C civarında tamamlanan ikinci bozunma kademesinden sonra tamamen  $\text{NiO}$ 'e dönüştüğünü göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Nikel okzalat, hidrodesülfürizasyon katalizörü, geri kazanım, nikel oksit.

## Production of Nickel Oxalate Dihydrate from Spent Ni-Mo Hydrodesulfurization Catalyst

### ABSTRACT

Spent Ni-Mo HDS catalyst is one of the most important secondary resources for the recovery of valuable metals. Recovery processes are important from the economical and environmental point of view. Ni content of Ni-Mo HDS catalyst was determined as 5.27 % after oxidative roasting. Production of  $\text{NiC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  from roasted HDS catalyst was investigated in this work. It is seen from the ICP-OES analysis that nickel concentration in the solution was increased to a maximum value at the beginning of the experiment and then decreased.  $\text{NiC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  was formed in a consecutive reaction in two steps.  $\text{NiC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  was produced with efficiency of 99.1 % from the experiment carried out using 1/10 solid/liquid ratio, 40 °C temperature, 1 M oxalic acid, 300 rpm stirring speed and 480 minutes reaction duration. TG-DTA analysis performed in dry air atmosphere showed that  $\text{NiC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  produced decomposed in two steps and formed  $\text{NiO}$  after second decomposition step at about 350 °C.

**Keywords:** Nickel oxalate, hydrodesulfurization catalyst, recovery, nickel oxide

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ni – Mo Hidrodesülfürizasyon (HDS) katalizörleri rafine petroldeki sülfürlü bileşiklerin uzaklaştırılması için yaygın olarak kullanılmaktadır. HDS katalizörleri  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ana yapı üzerine farklı oranlarda Ni ve Mo bileşiklerinin ilave edilmesi ile elde edilmektedir. Katalizörlerin petrokimya rafinerilerinde kullanımı sırasında, yüzeylerinde karbon, kükürt ve metaller (V, Fe, Zn ve As) birirmektedir. Zamanla yüzeyde biriken bu bileşikler katalizörün özelliklerini kötü yönde etkilemekte ve katalitik etkisini kaybetmesine yol açmaktadır. Rejenerasyon işlemleri ile katalizörlerin tekrar kullanımı mümkün olmaktadır. Ancak çok sayıda rejenerasyon işlemine tabi tutulmuş katalizörler artık tekrar kullanıma sunulamamakta ve atık haline gelmektedir [1]. Kullanılmış katalizörler tehlikeli atık olarak tanımlanmakta ve doğaya atılmaları çevresel problemlere yol açmaktadır.

Bu tür atıkların depolanması da çevre yasaları ile ciddi

şekilde kontrol altında tutulmaktadır [2]. Bu tür atıkların depolanması da çevre yasaları ile ciddi şekilde kontrol altında tutulmaktadır [2]. Kullanılmış Ni – Mo HDS katalizörleri Al (% 15–30), Mo (% 4–12), Ni (% 1–5), Co (% 0–4), karbon ve sülfür içermektedir [3]. Buna bağlı olarak kullanılan katalizörün bileşimi katalizör ve petrolün türüne göre farklılık göstermektedir. Kullanılmış katalizörler önemli miktarda değerli elementleri içermektedir. Bu elementlerin ikincil kaynaklardan geri kazanılması artan ihtiyacı karşılamak bakımından önemli olmakla birlikte aynı zamanda birincil kaynaklardan yapılan üretimin daha maliyetli, uzun süren, zahmetli ve çevreye karşı zararlı etkilerinin olmasından dolayı da önem arz etmektedir.

Geri kazanım proseslerinde genellikle hidrometalurjik yöntemler kullanılmaktadır. Kullanılmış Ni-Mo HDS katalizör atıkları asidik ya da bazik çözeltiler kullanılarak çözündürülmekte ve elde edilen liç çözeltilerinden değerli metaller kazanılabilmektedir [4-9]. Hem liç veriminin artırılması hem de oluşabilecek yan reaksiyonların önlenmesi sebebiyle liç işlemine

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : ilhans@istanbul.edu.tr

geçilmeden önce katalizör artıklarında bulunan karbon ve sülfürlü bileşiklerin uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu sayede liç işlemi sırasında kullanılan reaktan miktarı da azaltılabilmektedir.

Karbon ve sülfürlü bileşiklerin uzaklaştırılması iki şekilde yapılmaktadır. Birinci yöntemde organik çözücüler (aseton, toluen, CS<sub>2</sub> vb.) yardımıyla karbon ve sülfür uzaklaştırılabilmektedir [10]. Kullanılan organik çözücüler genellikle sağlığa zararlıdır ve kullanımları özel ekipman gerektirmektedir. Ayrıca maliyetleri daha fazladır [11]. İkinci yöntemde karbon ve kükürtlü bileşikler pirometalurjik yöntemle uzaklaştırılmaktadır. Bunun için oksitleyici atmosferde kavurma işlemi yapılmakta; karbon ve sülfürlü bileşikler liç kademesinde daha kolay çözünebilir oksitli bileşiklere dönüştürülmektedir [12-15]. Ancak oksitleyici kavurma işleminde en önemli parametre oksitleyici kavurma sıcaklığı ve ısıtma hızının iyi belirlenmesidir. Uygun olmayan şartlarda gerçekleştirilen oksitleyici kavurma işlemi istenmeyen fazların oluşumuna yol açabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen oksitleyici kavurma işlemi karbon ve kükürtlü bileşiklerin tamamen uzaklaştırılabilmesini sağlayamazken, yüksek sıcaklıklarda ya da yüksek ısıtma hızlarında gerçekleştirilen oksitleyici kavurma işlemi sonucunda liç çözeltilerinde zor çözünen bileşikler oluşabilmektedir.

Kullanılmış HDS katalizörü; endüstriyel atık çözeltiler [16-23], kullanılmış piller [24-27], katalizörler [28], elektronik atıklar ve paslamaz çelik üretimi sırasında oluşan tozlar ile birlikte önemli ikincil nikel kaynaklarını oluşturmaktadır [16]. Chaudhary ve diğerleri [29]; düşük oranda nikel içeren kullanılmış katalizörün hidroklorik asit içeren çözeltilerde liçini takip eden nikel hidroksit çöktürme ve kalsinasyon işlemi sonucunda nikeli nikel oksit şeklinde elde etmiştir. Alex ve Suri [30]; nikel içeren katalizörün çözündürülmesi için klorürlü çözeltilerde liç için iyi bir yöntem olduğunu belirtmiştir. Alex ve diğerleri [31]; indirgeyici kavurma işlemi takip eden sülfürik asit liçi ile kullanılmış katalizöründeki nikelin % 83' ünü geri kazanmıştır. Tilley [32]; kullanılmış katalizörün 921 K sıcaklıkta hava atmosferinde kavrulmasını takiben % 20 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde liçi ile nikelin geri kazanımını incelemiştir. Al-Mansi [33]; alümina bazlı kullanılmış katalizörden nikelin liçi ile ilgili yaptığı çalışmada yüksek konsantrasyonlu sülfürik asit çözeltisi (% 50) kullanmış ve nikel sülfat kristalleri elde etmiştir.

Valverde ve diğerleri [14]; kullanılmış Ni-Mo katalizörünü 500 °C' de kavurduktan sonra 90 °C' de 9 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde çözündürmüştür. Molibden solvent ekstraksiyonu ile geri kazanıldıktan sonra çözeltiye amonyum okzalit ilave edilerek nikeli % 98 verimle nikel okzalit olarak çöktürmüştür.

Bu çalışmada kullanılmış Ni-Mo HDS katalizörüne oksitleyici kavurma işlemi uygulanmış ve elde edilen kavrulmuş katalizör dört farklı katı/sıvı oranı kullanılarak okzalik asit çözeltisinde çözündürülmüştür. Çözünmüş

nikelden, nikel okzalit dihidrat oluşumu ve reaksiyon mekanizması belirlenmiştir. Nikel okzalit dihidrat çöktürülmesi için en uygun katı/sıvı oranı belirlenmiştir. Ayrıca XRD, SEM – EDS, TG-DTA analiz teknikleri ile üretilen nikel okzalit dihidratın karakterizasyonu yapılmıştır ve termal bozunma davranışı incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS and METHODS)

Kullanılmış Ni-Mo HDS katalizörü hava atmosferinde yatay tip tüp fırında (Lenton) 500 °C sıcaklıkta 4 saat süre ile kavrulmuş ve yapısında bulunan kükürt ve karbon içeren bileşikler uzaklaştırılmıştır. Okzalik asit çözeltileri susuz okzalik asit (Fluka) kullanılarak hazırlanmıştır. Karbon-kükürt analizi (Thermo Finnigan Flash EA 1112) yapılarak katalizörün içerdiği uçucu madde miktarı belirlenmiştir. Kimyasal bileşiminin kantitatif olarak belirlenmesi için XRF analizi (PA Nalytical Axios Minerals), içerdiği fazların belirlenmesi için XRD analizi (Rigaku D/Max-2200, Cu-K<sub>α</sub> monokromatik X-Işını) yapılmıştır. Kavrulmuş Ni-Mo HDS katalizöründen nikel okzalit üretimi için yapılan deneyler 1 L hacme sahip su ısıtmalı borosilikat çift cidarlı cam reaktörde (HWS DN 100) gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 1 L, 1 M okzalik asit çözeltisi, 1/4, 1/10, 1/20 ve 1/40 katı/sıvı oranı, 40 °C deney sıcaklığı ve 300 rpm karıştırma hızı kullanılmıştır. Deney sistemine ait detaylı bilgiler daha önce gerçekleştirilen çalışmada mevcuttur [34]. 1 L çözelti reaktörde deney sıcaklığına ısıtıldıktan sonra tartılan numune reaktöre ilave edilerek deneyler başlatılmıştır. Deney sırasında belli sürelerde (5, 15, 30, 60, 120, 240, 360 ve 480 dakika) reaktörden sıvı numune alınmış ve ICP-OES cihazında analiz edilmiştir. Böylece çözünen nikel miktarı süreye bağlı olarak belirlenmiştir. Deney sonucunda reaktördeki çözelti G-4 Gooch krozesinden süzülerek katı madde ayrılmış ve etüvde 105 °C sıcaklıkta kurutulmuştur. Katı maddenin içerdiği fazlar için XRD, termal bozunma davranışını belirlemek için TGA-DTA-MS (TA SDT Q600), morfolojisi incelemek için SEM (Jeol JSM 5600, Japan) ve kimyasal bileşiminin belirlenmesi için yarı kantitatif EDS analizleri (iXRF 500, USA) yapılmıştır.

## 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Kullanılmış Ni-Mo HDS katalizörüne ait karbon kükürt analizi sonuçları Çizelge 1'de gösterilmiştir. Buna göre toplam uçucu madde miktarının % 25,71 olduğu görülmektedir.

**Çizelge 1.** Kullanılmış Ni-Mo HDS katalizörünün CHSN analizi.

(CHSN analysis of Spent Ni-Mo HDS Catalyst)				
Element	C	H	S	N
(Ağ. %)	10.43	0.8	14.13	0.35

500 °C sıcaklıkta hava atmosferinde 4 saat süre ile kavrulmuş Ni-Mo HDS katalizörüne ait XRF analizi sonuçları da Çizelge 2'de gösterilmiştir. Katalizör % 5,27

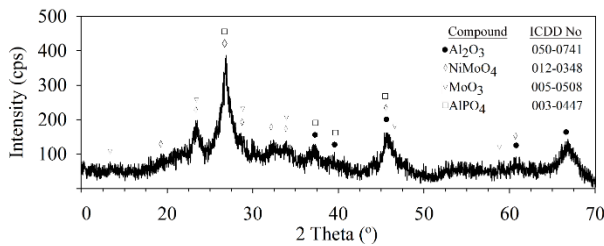
Ni içermekteyken çok az miktarda (% 0,005) S içermektedir. S miktarının bu seviyede olması kavurma işleminin

nikel konsantrasyonunda meydana gelen azalma diğer katı/sıvı oranlarında meydana gelen azalmaya göre

**Çizelge 2.** Kavrulmuş Ni-Mo HDS katalizörüne ait elementel analizi.  
(Elemental Analysis of Roasted Ni-Mo HDS Catalyst)

Element	Al	Mo	Ni	P	Si	Fe	Ca	Na	S
(Ağ. %)	27.70	20.24	5.27	4.33	0.16	0.08	0.12	0.007	0.005

başarılı şekilde yapıldığını ortaya koymaktadır. Şekil 1’de gösterilen XRD analizi sonuçlarından kavrulmuş Ni-Mo HDS katalizörünün  $Al_2O_3$  (ICDD Card No: 050-0741),  $NiMoO_4$  (ICDD Card No: 012-0348),  $MoO_3$  (ICDD Card No: 005-0508) ve  $AlPO_4$  (ICDD Card No: 003-025-0581) fazlarını içerdiği görülmektedir.



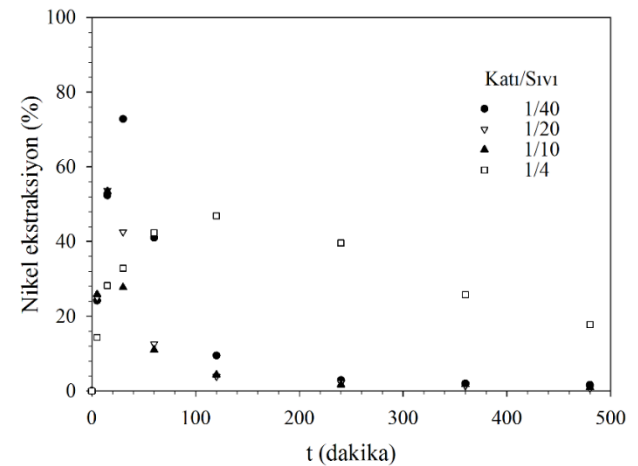
**Şekil 1.** Kavrulmuş Ni-Mo HDS katalizörüne ait XRD diyagramı. (XRD diagram of roasted Ni-Mo HDS Catalyst)

### 3.2. Nikel Okzalat Dihidrat Üretimi ve Kimyasal Reaksiyon Mekanizmasının İncelenmesi (Production of Nickel Oxalate Dihydrate and Investigation of Chemical Reaction Mechanism)

Farklı sıcaklık, okzalik asit konsantrasyonu ve karıştırma hızı kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda optimum deney şartlarının 1 M okzalik asit çözeltisi, 40 °C deney sıcaklığı ve 300 rpm karıştırma hızı olduğu belirlenmiştir. Artan sıcaklıkla birlikte katalizörün bileşiminde bulunan alüminyum ve fosfor da artan miktarda çözünerek çözeltiliye geçmekte ve okzalik asit sarfiyatını önemli oranda artırmaktadır [35]. 1 L, 1 M okzalik asit çözeltisi içerisinde 40 °C sıcaklık ve 300 rpm karıştırma hızında dört farklı katı/sıvı oranı kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen çözeltilerde çözülmüş olan nikel miktarı ICP-OES cihazı ile belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre nikel ekstraksiyon (%) – süre (dakika) diyagramları çizilmiş ve Şekil 2’de gösterilmiştir.

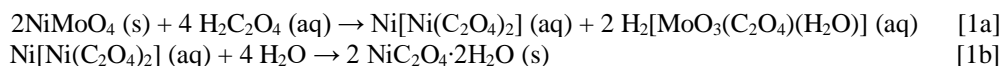
1/40, 1/20 ve 1/10 katı/sıvı oranı ile gerçekleştirilen deneylere ait nikel ekstraksiyon (%) – süre grafikleri incelendiğinde, çözeltideki nikel konsantrasyonunun deney başlangıcında hızlı bir şekilde arttığı (1/40 için % 70, 1/20 için % 54 ve 1/10 için % 53) ve sonra azalarak deney sonuna doğru sıfıra yaklaştığı görülmektedir (1/40 için % 1,5, 1/20 için % 0,8 ve 1/10 için % 0,9). 1/4 katı/sıvı oranı ile yapılan deneye ait diyagramda ise diğerlerinden farklı olarak nikel konsantrasyonu yavaş yavaş artmış ve maksimum değere ulaştıktan (% 46) sonra azalmaya başlamıştır. Fakat bu katı/sıvı oranında

oldukça düşüktür (% 18). Bu durum 1/4 katı/sıvı oranı ile yapılan deneyde stokiometrik orandan daha fazla katı kullanılması nedeniyle okzalik asit miktarının yetersiz kalmasından kaynaklanmaktadır. Okzalik asit miktarı yetersiz olduğu için çözülmüş halde bulunan nikel, nikel okzalat olarak çökmektedir. Çözeltideki nikel konsantrasyonunun azalması kavrulmuş Ni-Mo HDS katalizörünün bileşiminde bulunan nikelin çözünerek okzalat iyonları ile reaksiyona girmesi ve nikel okzalat bileşiği şeklinde çökmesinden dolayıdır. 1/10 katı/sıvı oranı ile gerçekleştirilen deney stokiometrik olarak yeterli miktarda okzalit asidin kullanıldığı en yüksek katı miktarı ile yapılan deney olduğu için bu katı/sıvı oranı ile yapılan deneyden elde edilen numune karakterizasyon analizlerinde kullanılmıştır.

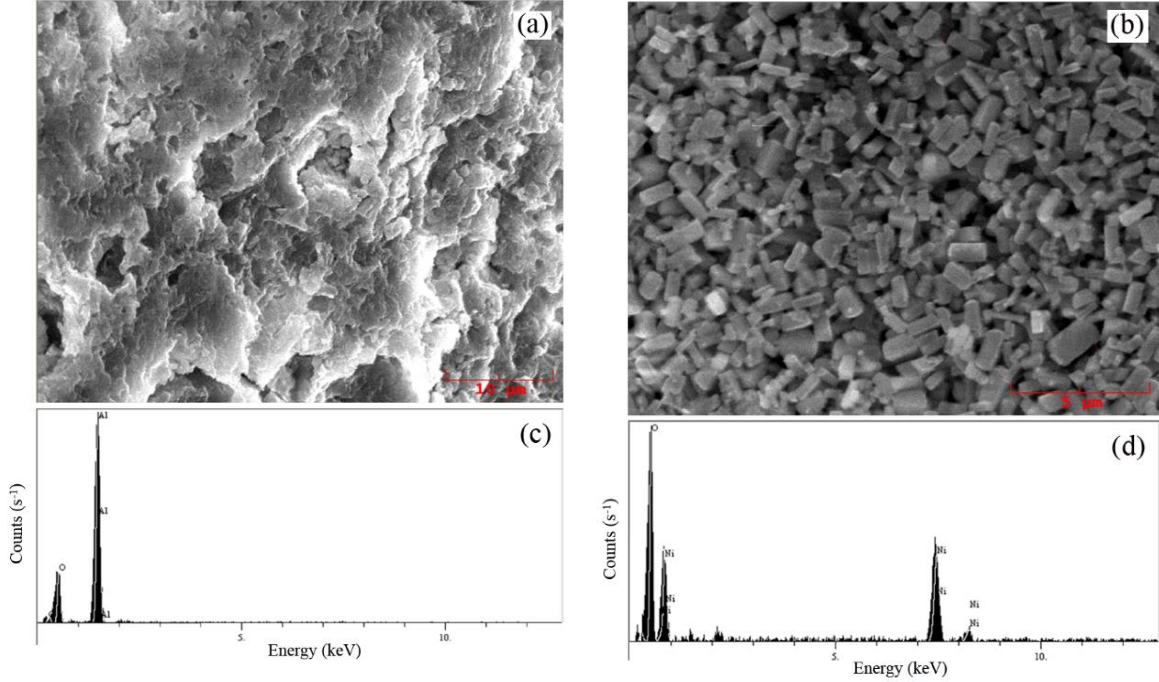


**Şekil 2.** Kavrulmuş Ni-Mo HDS katalizörünün dört farklı katı/sıvı oranı kullanılarak okzalik asit çözeltisi içerisinde çözüldürülmesi ile elde edilen nikel ekstraksiyon (%) - süre diyagramı. (Nickel extraction (%) – time diagrams obtained from the dissolution of roasted Ni-Mo HDS catalyst in oxalic acid solution using four different solid/liquid ratios.)

$NiC_2O_4 \cdot 2H_2O$  çöktürülmesi ile ilgili literatürde iki ayrı durum söz konusudur. İlk duruma göre  $NiC_2O_4 \cdot 2H_2O$  ilk adımda nikelin okzalat iyonları ile reaksiyon girmesi ile oluşan  $NiC_2O_4$ ’ın hidroliziyle çöktürülmektedir [36]. Nikel okzalatların oluşumları ve özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalar  $NiC_2O_4$ ’ın çözünlüğüne geniş bir aralıkta değiştiğini göstermektedir [37]. Belli miktardaki  $NiC_2O_4 \cdot 2H_2O$ ’ın  $NiC_2O_4$  (aq) oluşumuyla çöktürülmüş olsa bile, bu çalışmada elde edilen çözeltideki yüksek





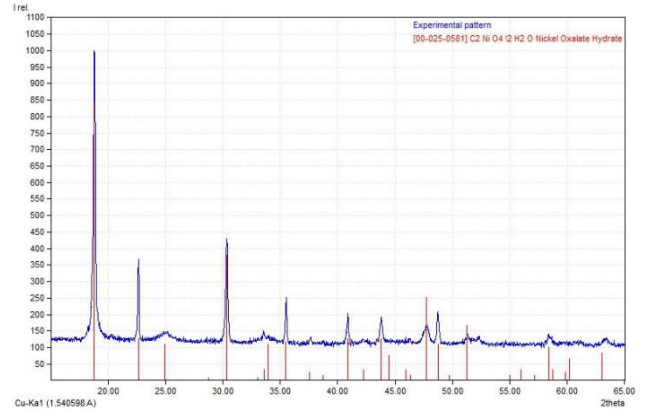


**Şekil 3.** Kavrulmuş Ni-Mo HDS katalizörünün 1/10 katı/sıvı oranı kullanılarak okzalik asit çözeltisi içerisinde çözündürülmesi sonucunda reaktörün dibinde kalan katı maddenin SEM – EDS analizi. (SEM-EDS analysis of solid obtained from the dissolution of roasted Ni-Mo HDS catalyst in oxalic acid solution using 1/10 solid/liquid ratio)

nikel konsantrasyonunu  $\text{NiC}_2\text{O}_4$ 'ın çözünürlüğü ile açıklamak mümkün değildir.  $\text{NiC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 'ın ikinci durumda belirtildiği gibi konsekutif reaksiyon sonucu oluşması daha uygundur [38]. İlk adımda  $\text{NiMoO}_4$  çözünmekte ve nikel iyonları nikel okzalat şelat bileşiği şeklinde çözeltilmeye geçmektedir (Reaksiyon 1a). Bu şelat bileşiği daha sonra bozunmakta ve  $\text{NiC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 'ı oluşturmaktadır (Reaksiyon 1b).

Deney sonucunda reaktörde kalan katı maddenin SEM analizi, farklı boyut ve morfolojiye sahip iki bileşenden oluştuğunu ortaya koymuştur (Şekil 3). İki bileşenin tane boyut farkı oldukça fazla olduğunda birbirlerinden kolaylıkla ayrılabilir. Şekil 3a' da silindirik şekilli katalizörün ana yapısını oluşturan ve okzalik asit çözeltisinde çözünmeden kalan  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'ün yüzeyi, Şekil 3c' de ise yarı kantitatif EDS analizi görülmekte ve Al ve O' e ait pikleri içermektedir. Şekil 3b' de ise silindirik şekilli katalizör partiküllerine göre oldukça küçük boyutlu (1  $\mu\text{m}$  civarında) nikel okzalat partiküllerinin yapısı görülmektedir. Bu partiküllere ait EDS analizinde Ni ve O' e ait pikler bulunmaktadır (Şekil 3d).

Nikel okzalat partiküllerinin faz yapısının kesin olarak belirlenmesi için XRD analizi yapılmış ve Şekil 4'te gösterilmiştir. XRD analizi sonucunda elde edilen numunenin  $\text{NiC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 'a (ICDD 025-0581) ait olduğu belirlenmiştir. Elde edilen ürün sadece  $\text{NiC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ' a ait pikleri içermekte olup başka herhangi bir maddeye ait pikler görülmemektedir.

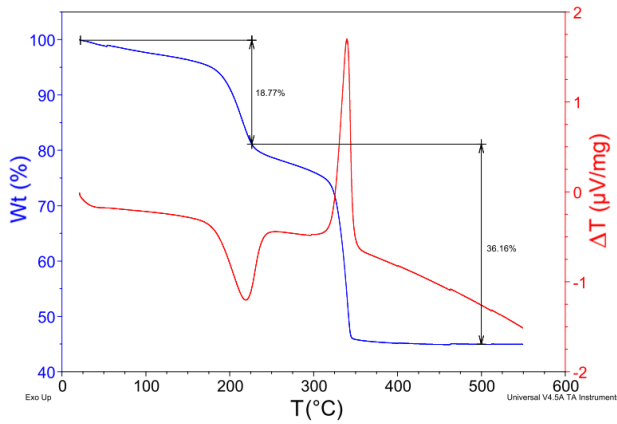


**Şekil 4.** Kavrulmuş Ni-Mo HDS katalizörünün 1/10 katı/sıvı oranı kullanılarak okzalik asit çözeltisi içerisinde çözündürülmesi sırasında oluşan tanelerin XRD analizi. (XRD analysis of particles obtained from the dissolution of roasted Ni-Mo HDS catalyst in oxalic acid solution using 1/10 solid/liquid ratio).

### 3.3. TG-DTA Analizi ( TG-DTA Analysis)

1/10 katı/sıvı oranı ile gerçekleştirilen deneyden elde edilen maddenin termal bozunma davranışını ve bozunma reaksiyonlarının belirlenmesi için 5 °C/min. ısıtma hızı, 100 mL/min. gaz geçiş hızı kullanılarak 550 °C sıcaklığa kadar kuru hava atmosferinde termogravimetrik analiz gerçekleştirilmiştir (Şekil 5). TG-DTA diyagramından maddenin iki adımda bozunduğu görülmektedir. 160-228 °C arasında meydana gelen birinci adımda % 18,77 lik ağırlık azalması

olmakta ve yapıya bağlı kristal su uzaklaşmaktadır. Bu durum DTA diyagramında maksimumu 220 °C civarında olan endotermik pik olarak görülmektedir. 308 – 350 °C arasında meydana gelen ikinci bozunma adımında ise % 36,16 ağırlık kaybı meydana gelmekte ve okzalatlardan yapıdan uzaklaşmaktadır. Bu esnada oluşan CO<sub>2</sub>'nin havadaki oksijenle reaksiyona girerek CO<sub>2</sub>'ye dönüşmekte ve bu etki DTA diyagramında maksimumu 340 °C civarında olan ekzotermik pik olarak görülmektedir. Rakshit ve diğerlerinin [39] yaptıkları çalışmada 165-225 °C arasında meydana gelen birinci ve 310-355 °C arasında meydana gelen ikinci bozunma adımlarında sırasıyla % 18,3 ve 36,7 ağırlık azalması meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bu sonuçlar bu çalışmada elde edilen sonuçlarla uyum içerisindedir.



**Şekil 5.** Kavrulmuş Ni-Mo HDS katalizörünün 1/10 katı/sıvı oranı kullanılarak okzalik asit çözeltisi içerisinde çözündürülmesi sırasında oluşan tanelerin TG-DTA analizi. (Gaz: kuru hava, gaz akış hızı: 100 mL/min. ve ısıtma hızı: 5 °C/min.) (TG-DTA analysis of particles obtained from the dissolution of roasted Ni-Mo HDS catalyst in oxalic acid solution using 1/10 solid/liquid ratio. (Gas: dry air, gas flow rate: 100 mL/min., and heating rate: 5 °C/min.)

## SONUÇ (CONCLUSION)

Kavrulmuş Ni-Mo HDS katalizör ile farklı katı/sıvı oranları kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde çözeltideki nikel konsantrasyonunun deney başlangıcında hızlı şekilde arttığı daha sonra ise azaldığı belirlenmiştir. Bu azalma 1/40, 1/20 ve 1/10 katı/sıvı oranında gerçekleştirilen deneylerde nikel ekstraksiyon (%) sırasıyla % 1.5, 0.8 ve 0.9'a düşene kadar sürmüştür. 1/4 katı/sıvı oranında ise 480 dakika sonrasında % 18'e düşmüştür.

NiC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O'nun oluşum mekanizmasının ilk adımda oluşan nikel okzalik şelat bileşiğinin ikinci adımda bozularak NiC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O'yu oluşturması şeklinde olduğu belirlenmiştir.

1/10 katı/sıvı oranı 1M okzalik asit konsantrasyonu, 40 °C sıcaklık, 300 rpm karıştırma hızı ve 480 dakika süre ile gerçekleştirilen deneyde tek adımda Ni-Mo HDS katalizöründen % 99.1 verimle NiC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O üretilmiştir.

Üretilen NiC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O'nun TG-DTA analizi endotermik olan ilk bozunma adımının 160-228 °C arasında tamamlandığı ve % 18,77'lik ağırlık azalması meydana geldiği; ekzotermik olan ikinci bozunma adımının ise 308-350 °C arasında tamamlandığı ve % 36,16'lık ağırlık azalması meydana geldiğini göstermiştir.

NiC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O'nun bozunması ile elde edilen NiO bileşiğinin özelliklerinin incelenmesinin ve NiO bileşiğinden hareketle elementel Ni üretim şartlarının belirlenmesinin bundan sonraki çalışmalar için potansiyel araştırma konuları oluşturduğu düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Dufresne, P., "Hydroprocessing catalysts regeneration and recycling", *Applied Catalysis A: General*, 322: 67-75, (2007)
2. EPA, U., "Hazardous waste management system; identification and listing of hazardous waste: Spent catalysts from dual-purpose petroleum hydroprocessing reactors", *Federal register*, 35379-35384, (2001)
3. Park, K.H., D. Mohapatra, and B.R. Reddy, "Selective recovery of molybdenum from spent HDS catalyst using oxidative soda ash leach/carbon adsorption method", *Journal of Hazardous Materials*, 138 (2): 311-316, (2006)
4. Siemens, R.E., B.W. Jong, and J.H. Russell, "Potential of spent catalysts as a source of critical metals", *Conservation & Recycling*, 9 (2): 189-196, (1986)
5. Hyatt, D.E., "Value recovery from spent alumina-base catalyst", *Google Patents*, (1987)
6. Lai, Y.-C., et al., "Metal recovery from spent hydrodesulfurization catalysts using a combined acid-leaching and electrolysis process", *Journal of Hazardous Materials*, 154 (1-3): 588-594, (2008)
7. Rabah, M.A., I.F. Hewaidy, and F.E. Farghaly, "Recovery of Molybdenum and Cobalt Powders from Spent Hydrogenation Catalyst", *Powder Metallurgy*, 40 (4): 283-288, (1997)
8. Mulak, W., et al., "Preliminary results of metals leaching from a spent hydrodesulphurization (HDS) catalyst", *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 40: 69-76, (2006)
9. Szymczycha-Madeja, A., "Kinetics of Mo, Ni, V and Al leaching from a spent hydrodesulphurization catalyst in a solution containing oxalic acid and hydrogen peroxide", *Journal of Hazardous Materials*, 186 (2-3): 2157-2161, (2011)
10. Villarreal, M.S., et al., "Recovery of Vanadium and Molybdenum from Spent Petroleum Catalyst of PEMEX", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 38 (12): 4624-4628, (1999)
11. Kim, H.-I., K.-H. Park, and D. Mishra, "Sulfuric acid baking and leaching of spent Co-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst", *Journal of Hazardous Materials*, 166 (2-3): 1540-1544, (2009)
12. Park, K.H., D. Mohapatra, and C.-W. Nam, "Two stage leaching of activated spent HDS catalyst and solvent extraction of aluminium using organo-phosphinic extractant, Cyanex 272", *Journal of Hazardous Materials*, 148 (1-2): 287-295, (2007)
13. Toyabe, K., et al., "Process for recovering valuable metal from waste catalyst", *Google Patents*, (1995)

14. Valverde, I.M., J.F. Paulino, and J.C. Afonso, "Hydrometallurgical route to recover molybdenum, nickel, cobalt and aluminum from spent hydrotreating catalysts in sulphuric acid medium", *Journal of Hazardous Materials*, 160 (2): 310-317, (2008)
15. Sun, D.D., et al., "Recovery of heavy metals and stabilization of spent hydrotreating catalyst using a glass-ceramic matrix", *Journal of Hazardous Materials*, 87 (1-3): 213-223, (2001)
16. Coman, V., B. Robotin, and P. Ilea, "Nickel recovery/removal from industrial wastes: A review", *Resources, Conservation and Recycling*, 73: 229-238, (2013)
17. Giannopoulou, I. and D. Panias, "Copper and nickel recovery from acidic polymetallic aqueous solutions", *Minerals Engineering*, 20 (8): 753-760, (2007)
18. Giannopoulou, I. and D. Panias, "Differential precipitation of copper and nickel from acidic polymetallic aqueous solutions", *Hydrometallurgy*, 90 (2): 137-146, (2008)
19. Sist, C. and G.P. Demopoulos, "Nickel hydroxide precipitation from aqueous sulfate media", *JOM*, 55 (8): 42-46, (2003)
20. Subbaiah, T., et al., "Electrochemical precipitation of nickel hydroxide", *Journal of Power Sources*, 112 (2): 562-569, (2002)
21. Agrawal, A., et al., "Recovery of nickel powder from copper bleed electrolyte of an Indian copper smelter by electrolysis", *Powder Technology*, 177 (3): 133-139, (2007)
22. Agrawal, A., et al., "Extractive separation of copper and nickel from copper bleed stream by solvent extraction route", *Minerals Engineering*, 21 (15): 1126-1130, (2008)
23. Nyirenda, R.L. and W.S. Phiri, "The removal of nickel from copper electrorefining bleed-off electrolyte", *Minerals Engineering*, 11 (1): 23-37, (1998)
24. Zhang, P., et al., "Hydrometallurgical process for recovery of metal values from spent nickel-metal hydride secondary batteries", *Hydrometallurgy*, 50(1): 61-75, (1998)
25. Zhang, P., et al., "Recovery of metal values from spent nickel-metal hydride rechargeable batteries", *Journal of Power Sources*, 77(2): 116-122, (1999)
26. Rydh, C.J. and M. Karlström, "Life cycle inventory of recycling portable nickel-cadmium batteries", *Resources, Conservation and Recycling*, 34(4): 289-309, (2002)
27. Bernardes, A.M., D.C.R. Espinosa, and J.A.S. Tenório, "Recycling of batteries: a review of current processes and technologies", *Journal of Power Sources*, 130 (1): 291-298, (2004)
28. Sahu, K.K., A. Agarwal, and B.D. Pandey, "Nickel recovery from spent nickel catalyst", *Waste Management & Research*, 23 (2): 148-154, (2005)
29. Chaudhary, A.J., et al., "Heavy metals in the environment. Part II: a hydrochloric acid leaching process for the recovery of nickel value from a spent catalyst", *Hydrometallurgy*, 34 (2): 137-150, (1993)
30. Alex, P. and A. Suri, "Processing of spent nickel catalyst", *Transactions of the Indian Institute of Metals (India)*, 51 (1): 55-67, (1998)
31. Alex, P., T. Mukherjee, and M. Sundaresan, "Reduction Roasting-Sulphuric Acid Leaching of Nickel From a Spent Catalyst", *Metals Materials and Processess (India)*, 3 (2): 81-91, (1991)
32. Tilley, G.L., "Recovery of metal values from spent catalysts", *Google Patents*, (1988)
33. Al-Mansi, N.M. and N.M. Abdel Monem, "Recovery of nickel oxide from spent catalyst", *Waste Management*, 22 (1): 85-90, (2002)
34. İlhan, S., et al., "The Use of Oxalic Acid as a Chelating Agent in the Dissolution Reaction of Calcium Molybdate", *Metallurgical and Materials Transactions B*, 44 (3): 495-505, (2013)
35. İlhan, S. "Leaching of Spent Ni-Mo Hydrodesulphurization (HDS) Catalyst in Oxalic Acid Solutions", *Cham: Springer International Publishing*, (2017)
36. Yao, Y.-I., et al., "Thermodynamics analysis of Ni<sub>2</sub>+C<sub>2</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>-C<sub>2</sub>O<sub>4</sub><sup>2-</sup>-H<sub>2</sub>O system and preparation of Ni microfiber", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23 (11): 3456-3461, (2013)
37. Mompean, F.J., M. Illemassène, and J. Perrone, "Chemical thermodynamics of compounds and complexes of U, Np, Pu, Am, Tc, Se, Ni and Zr with selected organic ligands", Vol. 9, *Elsevier*, (2005)
38. Allen, J.A., "The Precipitation of Nickel Oxalate", *The Journal of Physical Chemistry*, 57 (7): 715-716, (1953)
39. Rakshit, S., et al., "Morphology control of nickel oxalate by soft chemistry and conversion to nickel oxide for application in photocatalysis", *RSC Advances*, 3(17): 6106-6116, (2013)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Large deflection analysis of prismatic cantilever beam comparatively by using combing method and iterative DQM

## *Birleşim metodu ve iteratif DQM ile prizmatik ankastre kirişlerde karşılaştırmalı büyük sehim analizi*

*Yazar(lar) (Author(s)): Zekeriya GİRGİN<sup>1</sup>, Faruk Emre AYSAL<sup>2</sup>, Hüseyin BAYRAKÇEKEN<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-5958-9735*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-9514-1425*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-1572-4859*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Girgin Z., Aysal F. E. and Bayrakçeken H., “Large deflection analysis of prismatic cantilever beam comparatively by using combing method and iterative DQM”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 111-120, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.504480

# Birleşim Metodu ve İteratif DQM ile Prizmatik Ankastre Kirişlerde Karşılaştırmalı Büyük Sehim Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Zekeriya GİRĞİN<sup>1</sup>, Faruk Emre AYSAL<sup>2\*</sup>, Hüseyin BAYRAKÇEKEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye

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

(Geliş/Received : 28.12.2018 ; Kabul/Accepted : 07.03.2019)

## ÖZ

Prizmatik ve prizmatik olmayan ankastre kirişlerin genel yüklenme koşullarındaki büyük sehim problemi için tam anlamıyla analitik çözüm bulunmamaktadır. Prizmatik olmayan bir ankastre kirişin ele alındığı durumlarda ise büyük sehim probleminin zorluğu daha da artmaktadır. Bu çalışmada, İteratif Diferansiyel Quadrature Metodunun (I-DQM) ve Birleşim Metodunun (BM) karşılaştırılması yapılmıştır. İki yöntemle ayrı ayrı prizmatik ankastre kirişlerde büyük sehim probleminin sayısal çözümü gerçekleştirilmiştir. Dado ve Sadler (2005) tarafından geliştirilen yarı-analitik yöntem ile karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar her iki yöntemin de ele alınan problemin çözümünde oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte I-DQM'in BM'ye daha hassas ve geniş aralıklı bir çözüm sağladığı ortaya koyulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Büyük sehim, iteratif diferansiyel quadrature metodu, birleşim metodu, nonlinear simülasyon, prizmatik ankastre kiriş.

# Large Deflection Analysis of Prismatic Cantilever Beam Comparatively by Using Combining Method and Iterative DQM

## ABSTRACT

There is no exactly analytical solution for the large deflection problem of prismatic cantilever beams under general loading conditions. In the case of considering a non-prismatic cantilever beam, the difficulty of the larger deflection problem is increased. In this study, the comparison of the Iterative Differential Quadrature Method (I-DQM) and the Combining Method (CM) was performed. Numerical solution of the large deflection problem was separately performed with both the I-DQM and the CM for prismatic cantilever beams. The obtaining results show that both of these methods gave more accurate solutions compared with a reliable semi-analytic method which was introduced by Dado and Sadler (2005). Besides, it was demonstrated that the I-DQM provided a more wide-range solution than the CM.

**Keywords:** Large deflection, iterative differential quadrature method, combining method, nonlinear simulation, cantilever prismatic beam.

## 1. INTRODUCTION

In recent years, the determination of large deflection behaviour of prismatic and non-prismatic cantilever beams has become a very important issue especially for civil, mechanical, aero plane and biomedical engineering. Beams and columns with varying strength values were used uniformly for distributing the strength and mass of complex structures. Besides, tiny cantilever beams were used for providing some functional properties to system in many special fields [1].

There is no exactly analytical solution for the large deflection problem of prismatic and non-prismatic cantilever beams under general loading conditions. Thus, numerical methods ensured proper approximations for

the solution of large deflection problems [2]. According to literature review, researchers performed numerical, approximately analytical, and semi-analytical solutions for the large deflection problem of many kinds of cantilever beams. However, some of these studies weren't provide proper accuracy for the solution of problem. Also, some of them ensured very high accuracy but algorithms of these studies caused very high calculation time or difficulty for using a daily solution of the large deflection problem [3-22].

Navaee and Elling investigated equilibrium configuration of a prismatic cantilever beam for different loading conditions using the Elliptic Integral Method. Results of the investigation showed that there was more than one equilibrium configuration for flexible beams [23]. Faulkner et al., developed a New Segmental Shooting Technique for the solution of large deflection

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : fayasa@aku.edu.tr

problem. The procedure used to solve the problem provided a solution for different boundary conditions. The proposed method was considered the large deflection problem as small deflection by dividing the beam into small pieces. The problem that was converted to the initial value problem was solved by the Shooting Technique [24]. Dado and Al-Sadder solved the large deflection problem of cantilever beams using a polynomial formulating the rotating angle of beam. Sadder et al. developed an algorithm for the solution of non-prismatic beams large deflection problem using Finite Difference Method [1]. Tolou and Herder carried out a semi-analytical solution procedure using the Adomian Decomposition Method for the large deflection problem of cantilever under point load. Results of the solutions proved that the solution procedure suitable for obtaining problem [17]. Batista obtained an analytical solution of equilibrium configuration of the large deflection problem of cantilever beams using Jacobi Elliptic Function [19].

In this study, comparison of the I-DQM and the CM is performed. With the intent to compare of the I-DQM and the CM, the large deflection analysis of prismatic cantilever beam was derived. The obtaining results proved that both methods were suitable for the nonlinear numerical solution. Besides, the I-DQM was ensured more accurate results than the CM.

## 2. WEIGHTING COEFFICIENT AND ITERATIVE DQM

Bellman et al. introduced the DQM for the numerical solution of differential equation in 1971. Most important parameter of this method is the calculation of weighting coefficients. Quan and Chan used Lagrange Polynomial as a test function for the calculation of weighting coefficients. Shu and Richards developed an algebraic formula for calculation of weighting coefficients using both approximations of Bellman et al. and Quan and Chan. This new method was called as Generalized DQM (GDQM) [25-29].

According to GDQM rth order derivative of f(x) is given in Equation 1.

$$\frac{d^r f(x_i)}{dx^r} = \sum_{j=1}^N a_{ij}^{(r)} f(x_j) \rightarrow i = 1, 2, \dots, N \tag{1}$$

Here f(x) is a function of x which is described in  $x \in [a, b]$ . Besides, f(x<sub>i</sub>) shows the numerical values of f(x) for a certain value of x<sub>i</sub> (i = 1, 2, ... N). In the Eq. 1 a<sub>ij</sub><sup>(r)</sup> shows the weighting coefficient of DQM for rth order derivative. Calculation of weighting coefficient is presented in Eq. 1 and 2 by using Lagrange Interpolation Function in the following terms.

$$l_j(x) = \frac{\phi(x)}{(x - x_j)\phi^{(1)}(x_j)} \rightarrow j = 1, 2, \dots, N \tag{2}$$

$$\phi(x) = \prod_{m=1}^N (x - x_m); \quad \phi^{(1)}(x_j) = \frac{d\phi(x_j)}{dx} = \prod_{m=1, m \neq j}^N (x_j - x_m) \tag{3}$$

$$a_{ij}^{(1)} = \frac{dl_j(x_i)}{dx} = \frac{\phi^{(1)}(x_i)}{(x_i - x_j)\phi^{(1)}(x_j)}, \quad i, j = 1, 2, \dots, N, i \neq j \tag{4}$$

$$a_{ii}^{(1)} = - \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}^{(1)}, \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{5}$$

Similarly,

$$a_{ij}^{(r)} = \frac{d^r l_j(x_i)}{dx^r} = r \left( a_{ii}^{(r-1)} a_{ij}^{(1)} - \frac{a_{ij}^{(r-1)}}{(x_i - x_j)} \right), \quad i, j = 1, 2, \dots, N, i \neq j, r \geq 2 \tag{6}$$

$$a_{ii}^{(r)} = \frac{d^r l_j(x_i)}{dx^r} = - \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}^{(r)}, \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{7}$$

$$a_{ii}^{(r)} = \sum_{k=1}^N a_{ik}^{(r-1)} a_{ik}^{(1)}, \quad i, j = 1, 2, \dots, N, r \geq 2 \tag{8}$$

The weighting coefficients computed using Equations from 2 to 8 described the matrix of [A<sup>(r)</sup>] given in Equation 9.

$$[A^{(r)}] = \left( \frac{d}{dx} \right)^r = \frac{d^r}{dx^r} = \frac{d^{r-1}}{dx^{r-1}} \frac{d}{dx} = \frac{d}{dx} \frac{d^{r-1}}{dx^{r-1}} = \begin{bmatrix} a_{11}^{(r)} & a_{12}^{(r)} & \dots & a_{1N}^{(r)} \\ a_{21}^{(r)} & a_{22}^{(r)} & \dots & a_{2N}^{(r)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1}^{(r)} & a_{N2}^{(r)} & \dots & a_{NN}^{(r)} \end{bmatrix} \tag{9}$$

Currently, many of researchers used the GDQM with intent to solve nonlinear engineering problems [30-34]. When the problem has multiple boundary conditions at the same point, the DQM could not provide a numerical solution. With the intent to avoid this situation, researchers developed a lot of methods such as  $\delta$  approximation. [35-39]. One of the most effective usages of the DQM is considered the method as an iterative scheme. Thus, iteration procedure provides the multiple boundary conditions at the same point. In this study, the

Newton-Raphson Iteration Method was used as the iteration procedure, given simply in Eq. 10.

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \tag{10}$$

### 3. COMBINING METHOD

One of the approaches used to overcome the difficulties encountered when using the DQM combined the DQM with another method [40-42].

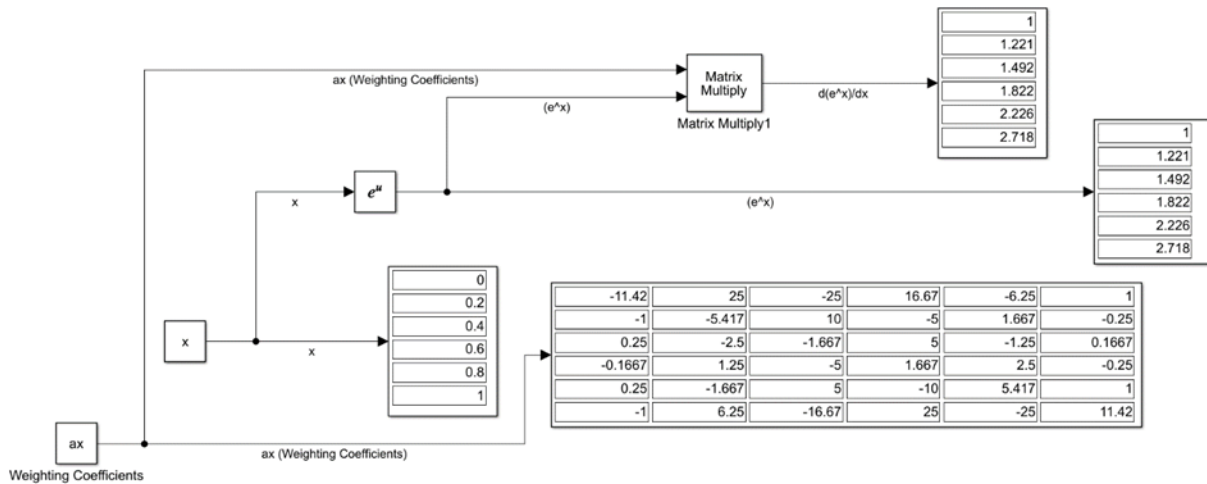


Figure 1. . Derivative of  $e^x$  by using CM

Girgin et al. developed the Combining Method (CM) which combined the DQM and Simulation Technique (ST) for providing applying multiple boundary conditions at the same point. ST was used for the solution of Ordinary Differential Equations (ODE) and automatic control problems. With this purpose, a lot of software was used such as Matlab/Simulink, Dymola, AMESim, and so on. Although the ST is a good method for the solution of ODE, the boundary conditions cannot be

entered into the system. So, the CM was ensured as a new approach for the solution of boundary conditions problem and resolved the weakness of both DQM and ST [43-45]. Simplest form of the CM with  $n=6$  grids is shown in Figure 1 for the derivative of  $e^x$ . Also, Figure 2 shows that how to solve the given ODE in Equation 11 using the CM with  $n=6$  grids.

$$\frac{dy}{dx} - y = 0, y(1) = e \tag{11}$$

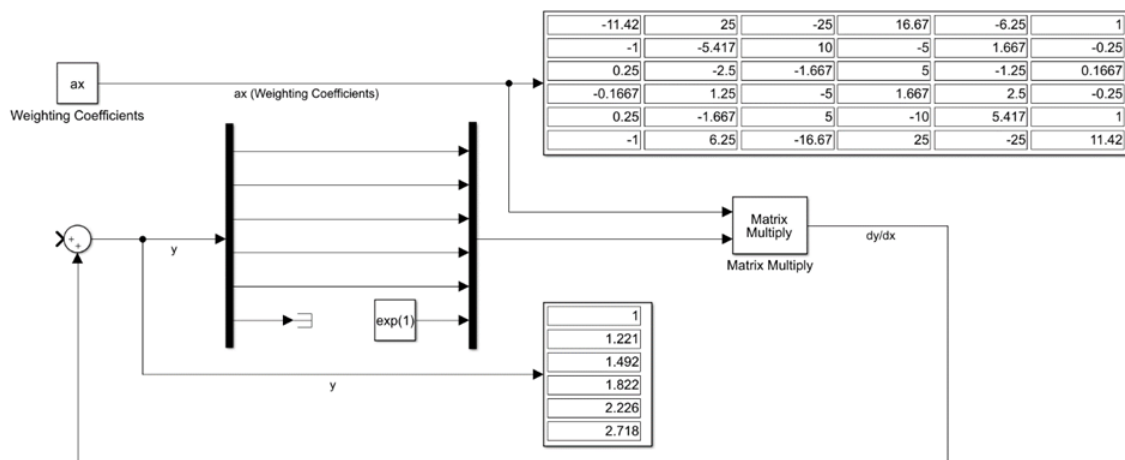


Figure 2. . Simple ODE solution using CM for Equation 11

**4. COMPARISON OF I-DQM AND CM**

The large deflection problem of prismatic cantilever beam considered for the purpose of comparison of I-

DQM and CM. Equation 12 is determined large deflection behaviour of prismatic cantilever beam [2].

$$EI(s) \frac{d^2\theta}{ds^2} + E \frac{dI(s)}{ds} \frac{d\theta}{ds} + \left[ \int_{s=s}^{s=L} q_y(s)ds + F_y \right] \cos\theta - \left[ \int_{s=s}^{s=L} q_x(s)ds + F_x \right] \sin\theta = 0 \tag{12}$$

The large deflection problem of prismatic cantilever beam investigated for two different loading conditions. Here, the elasticity modulus of the beam material and inertia of the beam are expressed as E and I(s), respectively. The distributed loads in the x and y directions and point loads from the free end are expressed by q<sub>y</sub>, q<sub>x</sub>, F<sub>x</sub> and F<sub>y</sub>, in Equation 11. The moment applied from the free end of the built beam obtained from the differential terms of Equation 11 as known from the theory of elasticity. In this study, EI(s) expression

considered to be equal to one cause of the obtaining the large deflection problem discussed for a prismatic cantilever beam. The slope and deflection values are zero at the point of the cantilever support based on the theory of elasticity. These values are considered as basic boundary conditions of the large deflection problem. The I-DQM algorithms which are given in Eq. 13, 14 and 15 provide the solution of the large deflection problem.

$$f = EI(s) \cdot A^{(2)} \cdot \theta + E \frac{dI(s)}{ds} A^{(1)} \cdot \theta + \left[ \int_{s=s}^{s=L} q_y(s)ds + F_y \right] \cos\theta - \left[ \int_{s=s}^{s=L} q_x(s)ds + F_x \right] \sin\theta \tag{13}$$

$$f = EI(s) \cdot A^{(2)} \cdot \theta + E \frac{dI(s)}{ds} A^{(1)} \cdot \theta + \left[ \int_{s=s}^{s=L} q_y(s)ds + F_y \right] \cos\theta - \left[ \int_{s=s}^{s=L} q_x(s)ds + F_x \right] \sin\theta \tag{14}$$

$$\theta(s) = \theta(s) - \frac{f}{f'} \tag{15}$$

The CM block diagram which gives the solution of the large deflection problem is given in Figure 3.

Here, “A” shows matrix of the weighting coefficients and bold terms shows Jacobians in the Newton Raphson Method.

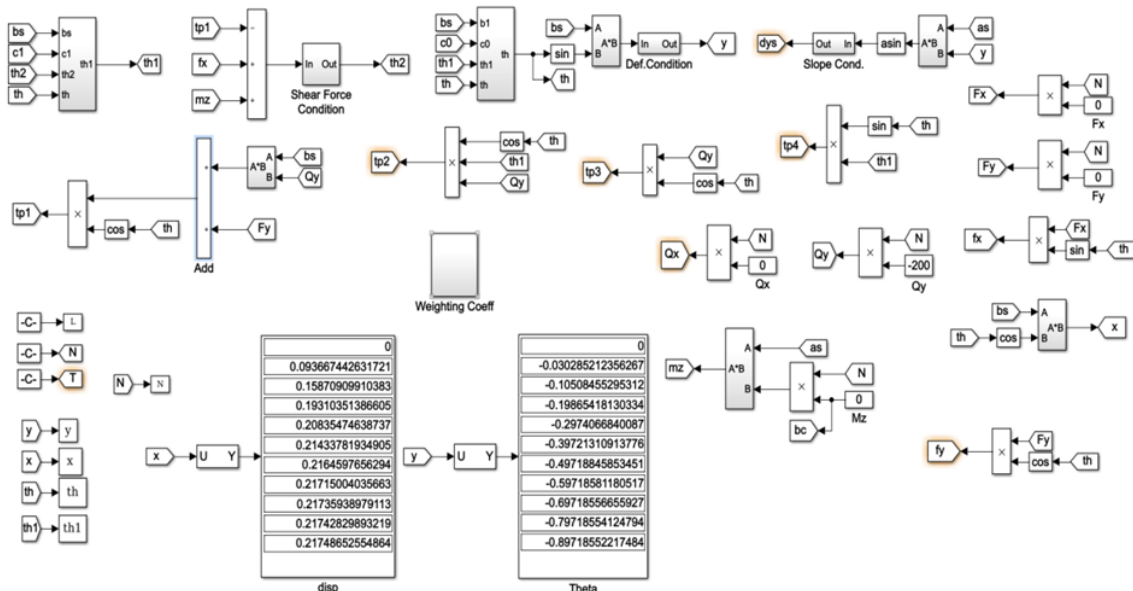


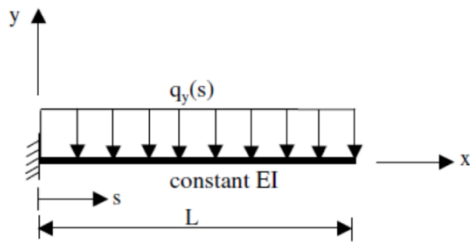
Figure 3. . Block Diagram of Solving the Large Deflection Problem by the CM

**Problem 1:**

Firstly, considered large deflection problem is shown in Figure 4. In this situation cantilever beam is discussed only under uniformly distributed load.

The solution obtained using I-DQM was considered for different values of the uniformly distributed load such as q<sub>y</sub>(s) = -4, -10, -20, -40, -100, -150, -200, and -1000.



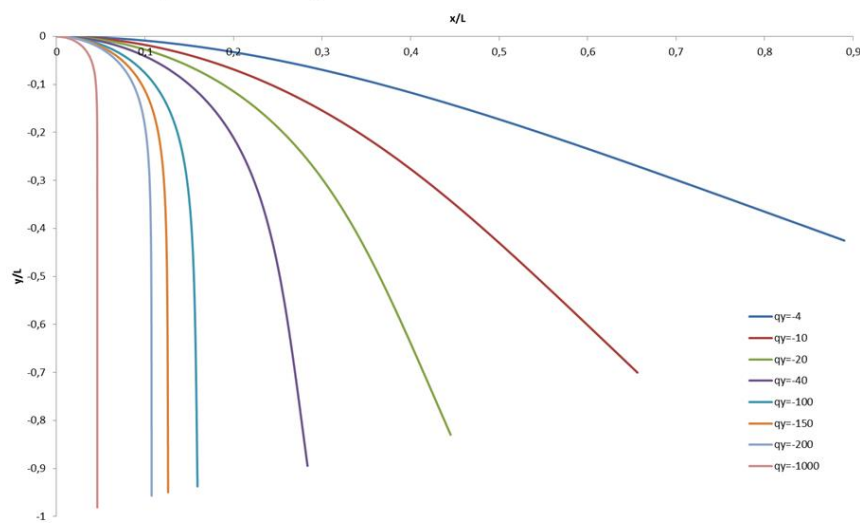


**Figure 4.** Cantilever Prismatic Beam under Uniformly Distributed Load.

The weighting coefficients matrix used while performing the solution was calculated by using 6 uniformly distributed grid points. Iteration number of the I-DQM was determined as 5. Results of numerical study provided

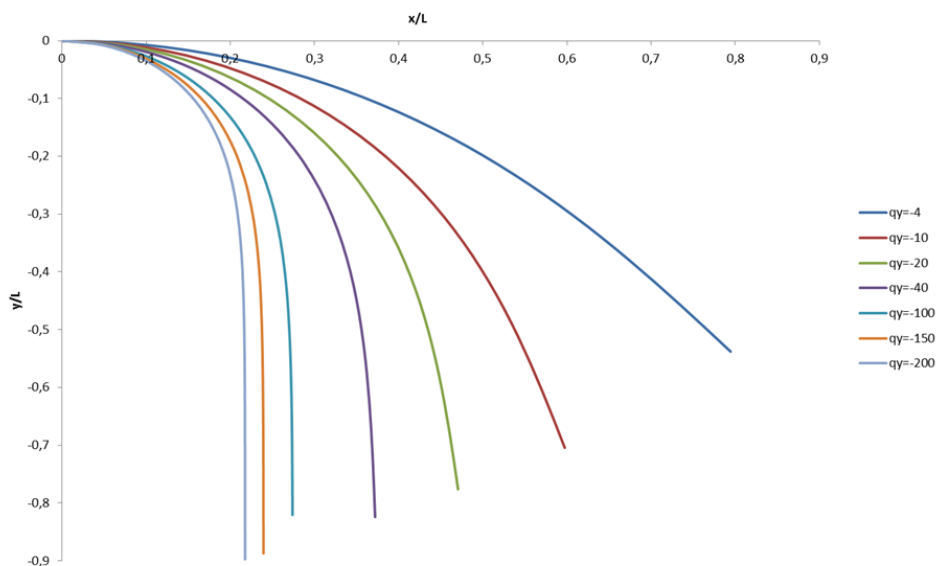
reliable solution for large deflection problem even with very small CPU times (Figure 5). Compared to the other results in the literature, the I-DQM was ensured to be very successful in numerical results for the large deflection problem. Similarly, numerical simulation of the large deflection problem was performed by using CM for the Problem 1 with different distributed loads such as  $q_y(s) = -4, -10, -20, -40, -100, -150$  and  $-200$  (Figure 6). 21 uniformly distributed grid points were used for computing the weighting coefficients of the CM. The obtaining results was shown that CM was reliable for solution of the large deflection problem.

**Large Deflection Diagram of Cantilever Beam Under Distributed Load**



**Figure 5.** Large Deflection Diagram of Cantilever Beam under Distributed Load with I-DQM.

**Large Deflection Diagram of Cantilever Beam Under Distributed Load**



**Figure 6.** Large Deflection Diagram of Cantilever Beam under Distributed Load with CM

Dado and Al-Sadder developed a new semi-analytical method for solution of large deflection problem. This study is one of the most accurate solution procedures for the large deflection problem. Thus, this study was used as a reference to measure the reliability of the solutions provided by the I-DQM and the CM. Figure 7 shows that the solution of the problem could be performed up to maximum distributed load value of  $q_y = -100$  [2]. The

results obtained using I-DQM provided a reliable solution up to the maximum distributed load  $q_y = -1000$ . Also, the CM is ensured that a proper solution up to the maximum distributed load  $q_y = -200$ . Hence, it was seen that both methods were effective for solving the large deflection problem of cantilever prismatic beams. Besides, the I-DQM was provide more accuracy than other studies.

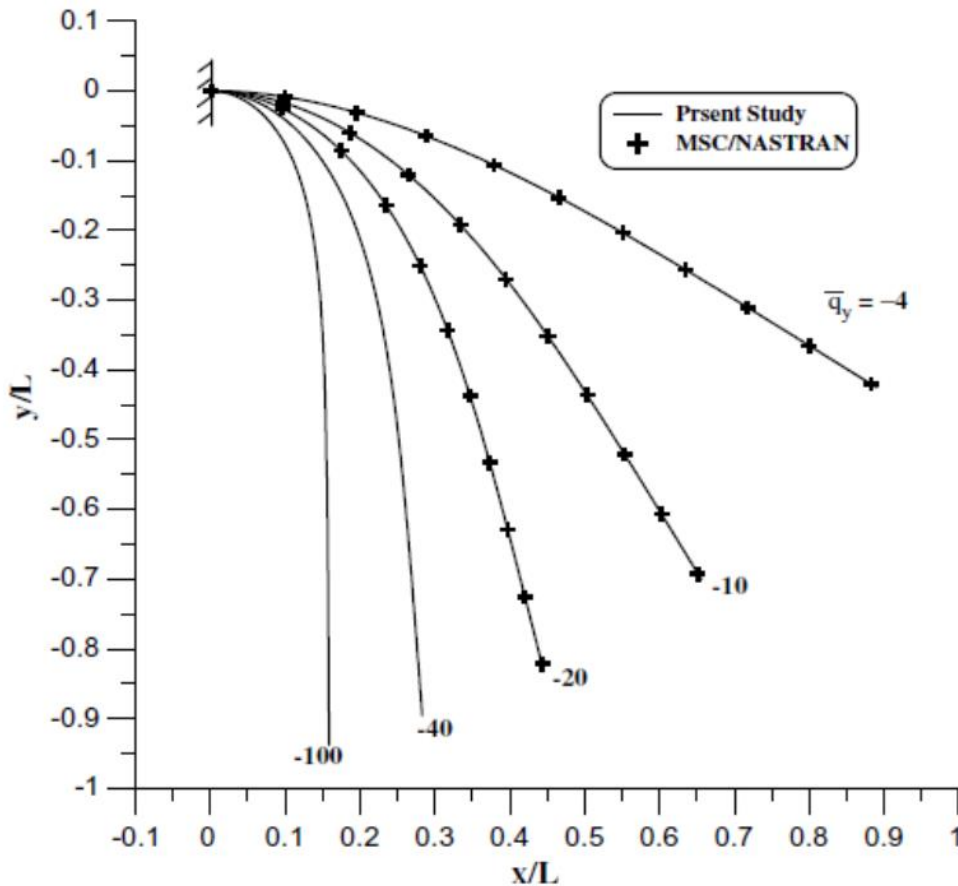


Figure 7. Results of the Problem 1 in the Study by Dado and Al-Sadder (2005).

**Problem 2:**

The second problem, solved by using I-DQM and CM, is shown in Figure 8. In this situation, the large deflection problem is considered under free end forces and moment. When the solutions using the I-DQM were compared with other results in the literature, it is clearly seen that the method is more successful than other studies according to the deflection diagrams shown in Figure 9. The results show that the large deflection problem can be solved using the I-DQM until to  $F_x = -18$ ,  $F_y = 104$ ,  $M_z = -18$ . As in the first problem discussed, it was observed that the problem of large deflection was solved in very

short CPU times which can be measured in milliseconds using 5 iterations and number of girds  $n = 6$ .

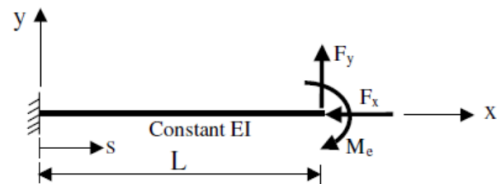
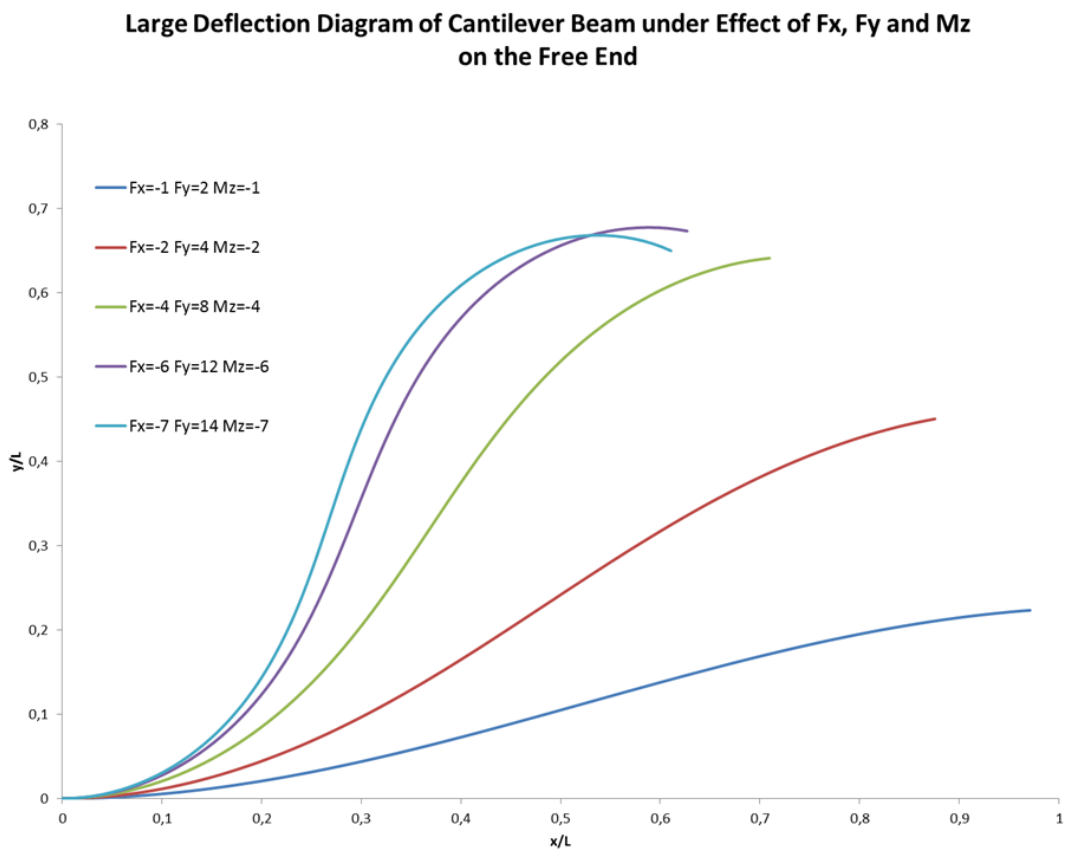
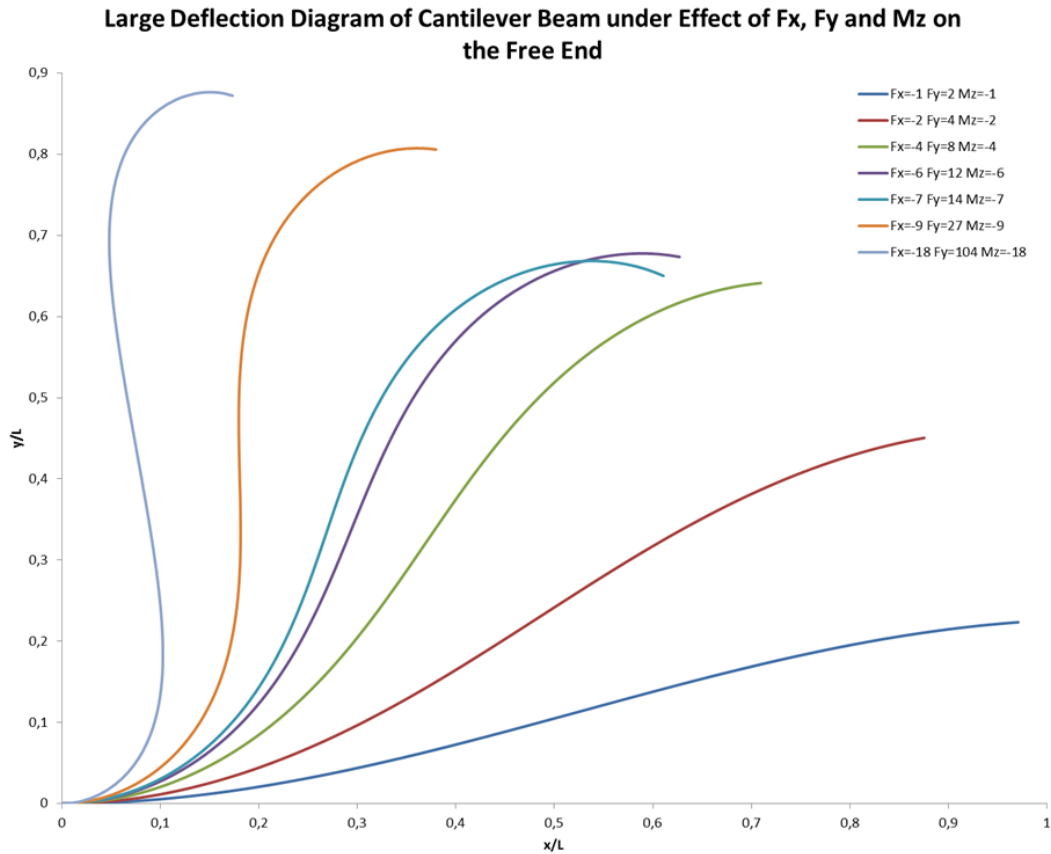


Figure 8. Cantilever Prismatic Beam under the Effect of  $F_x$ ,  $F_y$  and  $M_e$



The deflection diagrams of the solutions for the problem 2 performed using the CM are given in Figure 10. According to this, reliable results can be obtained up to  $F_x = -7$ ,  $F_y = 14$ , and  $M_z = -7$  using 21 grids. It was found that the method did not achieve sufficient accuracy at higher load values.

It is clear that both methods are significantly successful (Figure 11) compared to other results in the literature. Reliable results can be obtained up to  $F_x = -7$ ,  $F_y = 14$ , and  $M_z = -7$  in the literature for solution of the Problem 2 [2]. Present study ensured wide range results using the I-DQM for the Problem 2. Also, the CM provided same accuracy with literature for the solution of the Problem 2.

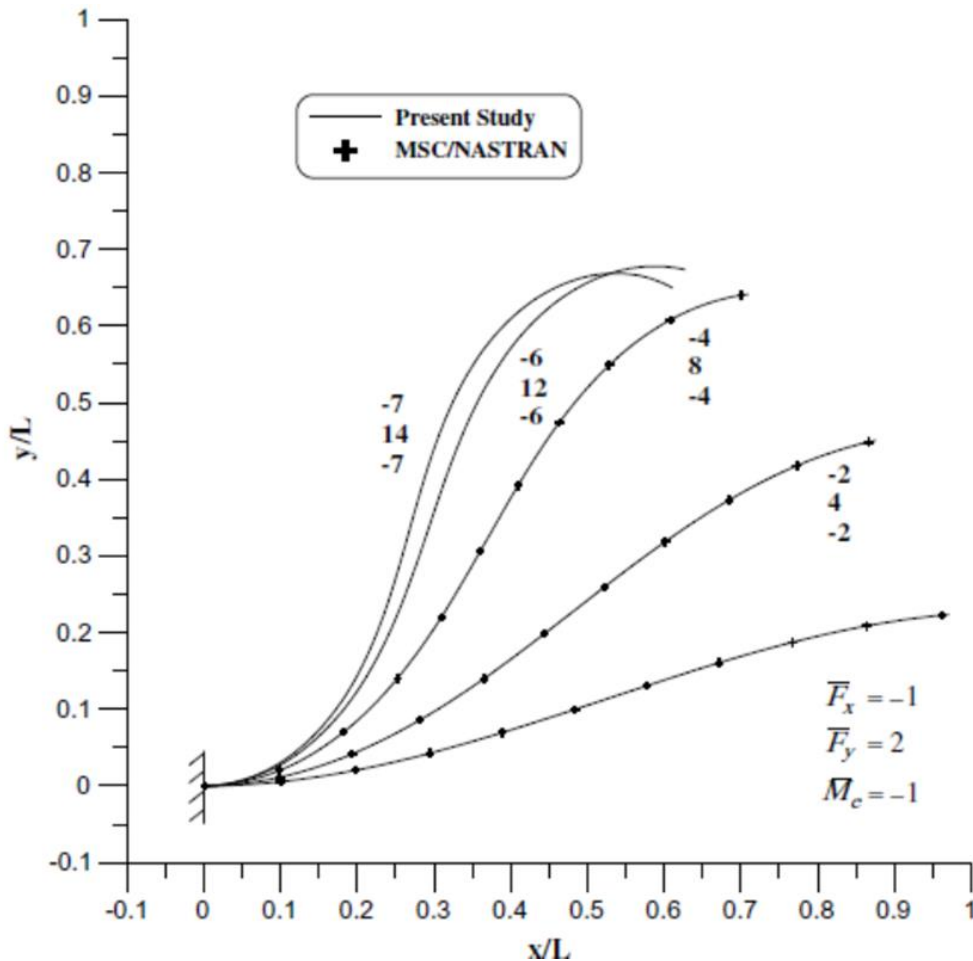


Figure 11. Results of the Problem 2 in the Study by Dado and Al-Sadder (2005)

## 6. CONCLUSIONS

In this study, the I-DQM and the CM were compared. Numerical solution of the large deflection problem was performed for prismatic cantilever beams with the I-DQM and the CM. The solutions performed using the CM ensured similar results with other studies in the literature. However, the solutions obtained using the I-DQM provided very high accuracy and a wide range of results at very low CPU times. Consequently, both of the methods seem to give reliable results for the structural large deflection problem.

## ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by Afyon Kocatepe University Scientific Research Projects Commission with 17.FEN.BIL.76 numbered project.

## REFERENCES

- [1]. AL-Sadder S. and AL-Rawi R. A. O., "Finite difference scheme for large-deflection analysis of non-prismatic cantilever beams subjected to different types of continuous and discontinuous loadings.", *Arch Appl Mech*, 75: 459-473, (2006).
- [2]. Dado M., and Al-Sadder S., "A new technique for large deflection analysis of non-prismatic cantilever beams.", *Mechanics Research Communications*, 32: 692-703, (2005).
- [3]. Barten H. J., "On the deflection of a cantilever beam". *Quart. J. Appl. Math.*, 3: 275, (1945).
- [4]. Bisshop K. E. ve Drucker D. C. "Large deflections of cantilever beams.", *Quart. J. Appl. Math.*, 3: 272-275, (1945).
- [5]. Freeman J. G. "Mathematical theory of deflection of beam", *Philos. Mag*, 37: 551, (1946).

- [6]. Conway H. D., "Large deflection of simply supported beams", *Philos. Mag*, 38: 905, (1947).
- [7]. Timoshenko S. P. and Gere J. M., "Theory of Elastic Stability." *McGraw-Hill*, New York, (1961)
- [8]. Holden J. T., "On the finite deflections of thin beams.", *Int. J. Solids Struct*, 8:1051-1055, (1972).
- [9]. Lau J. H., "Large deflections of beams with combined loads", *ASCE J. Eng. Mech. Div*, 12:140, (1974).
- [10]. Wang, C. Y. And Watson L. T., "On large deformations of C-shaped springs.", *Int. J. Mech. Sci*, 22: 395-400, (1980).
- [11]. Chucheepsakul S., Buncharoen S. and Wang C. M., "Large deflection of beams under moment gradient.", *ASCE J. Eng. Mech*, 120: 1848, (1994).
- [12]. Bona F. and Zelenika S., "A generalized elastica-type approach to the analysis of large displacements of spring-strips.", *Proc. Inst. Mech. Engrs. Part C*, 21: 509-517, (1997).
- [13]. Wang X. W., and Gu H. Z., "Static Analysis of Frame Structures by The Differential Quadrature Element Method." *International Journal for Numerical Method in Engineering*, 40: 759-772, (1997).
- [14]. Chucheepsakul S., Wang C. M. and He X. Q., "Double curvature bending of variable-arc-length elastica.", *J. Appl. Mech*, 66: 87-94, (1999).
- [15]. Coffin D. W. and Bloom F., "Elastica solution for the hydrothermal buckling of a beam.", *Int. J. Non-lin. Mech*, 34: 935, (1999).
- [16]. Kang T.J., Kim J.G., Kim J.H., Hwang K.C., Lee B.W., Baek C.W., Kim C.W., Kwon D., Lee H.Y. and Kim Y.H., "Deformation characteristics of electroplated MEMS cantilever beams released by plasma ashing.", *Sensors and Actuators A: Physical*, 148: 407-415, (2008).
- [17]. Tolou N. And Herder J. L., "A Semianalytical Approach to Large Deflections in Compliant Beams under Point Load.", *Mathematical Problems in Engineering*, 13 pages, (2009).
- [18]. Lin H. P. and Chang S. C., "Forced responses of cracked cantilever beams subjected to a concentrated moving load", *International Journal of Mechanical Sciences*, 48: 1456-1463, (2006).
- [19]. Batista M., "Analytical treatment of equilibrium configurations of cantilever under terminal loads using Jacobi elliptical functions", *International Journal of Solids and Structures*, 51: 2308-2326, (2014).
- [20]. Wang K.F. and Wang B.L., "A general model for nano-cantilever switches with consideration of surface effects and nonlinear curvature.", *Physica E*, 66:197-208, (2015).
- [21]. Joseph R.P., Wang B.L. and Samali B., "Size effects on double cantilever beam fracture mechanics specimen based on strain gradient theory.", *Engineering Fracture Mechanics*, 169: 309-320, (2017).
- [22]. Abu-Alshaikh I. M., "Closed-Form Solution of Large Deflected Cantilever Beam against Follower Loading Using Complex Analysis", *Modern Applied Science*, 11(12): 12-21, (2017).
- [23]. Navaee, S. and Elling, R. E., "Equilibrium configurations of cantilever beam subjected to inclined end loads.", *Trans. ASME*, 59: 572-579, (1992).
- [24]. Faulkner M. G., Lipsett A. W. and Tam V., "On the use of a segmental shooting technique for multiple solutions of planar elastica problems.", *Comp Meth Appl Mech Eng*, 110: 221-236, (1993).
- [25]. Bellman R. and J. Casti J., "Differential Quadrature and long term integration.", *J. Math. Anal. Appl*, 34 235-238, (1971).
- [26]. Bellman R., Kashef B.G. and Casti J., "Differential Quadrature: a technique for the rapid solution of non-linear partial differential equations.", *J. Comput. Phys.*, 10: 40-52, (1972).
- [27]. Quan J. R., and Chang C. T., "New Insights in Solving Distributed System Equations by The Quadrature Methods I.", *Computational Chemical Engineering*, 13 779-788, (1989a).
- [28]. Quan J. R., and Chang C. T., "New Insights in Solving Distributed System Equations by The Quadrature Methods. II.", *Computational Chemical Engineering*, 13: 1017-1024, (1989b).
- [29]. Shu, C. and Richards B.E., "Application of generalized differential quadrature to solve two dimensional incompressible Navier Stokes equations.", *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 15: 791-798, (1992).
- [30]. Jiwari R., Pandit S., and Mittal R. C., "Numerical simulation of two-dimensional Sine-Gordon solitons by differential quadrature method.", *Computer Physics Communications*, 183: 600-616, (2012).
- [31]. Ansari, R., Gholami R., Shojaei M. F., Mohammadi V. and Sahmani S., "Size-dependent bending, buckling and free vibration of functionally graded Timoshenko microbeams based on the most general strain gradient theory.", *Composite Structures*, 100: 385-397, (2013).
- [32]. Alinaghizadeh, F. and Shariati M., "Geometrically non-linear bending analysis of thick two-directional functionally graded annular sector and rectangular plates with variable thickness resting on non-linear elastic foundation.", *Composites Part B*, 86: 61-83, (2016).
- [33]. Yilmaz Y., Girgin Z., and Evran S. "Buckling Analyses of Axially Functionally Graded Nonuniform Columns with Elastic Restraint Using a Localized Differential Quadrature Method.", *Mathematical Problems in Engineering*, 12 pages, (2013).
- [34]. Sahmani S., Aghdam M. M. and Bahrami M., "On the free vibration characteristics of postbuckled third-order shear deformable FGM nanobeams including surface effects.", *Composite Structures*, 121: 377-385, (2015).
- [35]. Jang S. K., Bert C. W. and Striz A. G., "Application of Differential Quadrature to Static Analysis of Structural Components.", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 28: 561-577, (1989).
- [36]. Wang, X., and Bert, C. W. "A New Approach in Applying Differential Quadrature to Static and Free Vibrational Analyses of Beams and Plates.", *Journal of Sound and Vibration*, 162(3): 566-572, (1993).
- [37]. Shu C., and Du H., "Implementation of Clamped and Simply Supported Boundary Conditions in The GDQ Free Vibration Analysis of Beams and Plates.", *International Journal of Solids and Structures*, 34(7): 819-835, (1997).
- [38]. Liu G. R., and Wu T. Y., "Numerical Solution for Differential Equations of Duffing-Type Non-Linearity Using The Generalized Differential Quadrature Rule.",

- Journal of Sound and Vibration*, 237(5): 805-817, (2000).
- [39]. Tomasiello S., "Simulating Non-Linear Coupled Oscillators by An Iterative Differential Quadrature Method.", *Journal of Sound and Vibration*, 265: 507-525, (2003).
- [40]. Liu F. L., and Liew K. M., "Analysis of Vibrating Thick Rectangular Plates with Mixed Boundary Constraints Using Differential Quadrature Element Method.", *Journal of Sound and Vibration*, 222 (5) 915-934 (1999).
- [41]. Chen C. N., "Differential Quadrature Element Analysis Using Extended Differential Quadrature.", *Computer and Mathematic with Application*, 39: 65-79, (2000).
- [42]. Kol C., "Diferansiyel Kuadratur (Quadrature) Eleman Metodunun Plakalara Uygulanması.", Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2003).
- [43]. Girgin Z., "Combining Differential Quadrature Method with simulation technique to solve nonlinear differential equations.", *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 75, (6): 723-733, (2008).
- [44]. Demir E., "Lineer Olmayan Titreşim Problemlerinin Çözümünde Birleşim (Diferansiyel Quadrature Ve Simülasyon) Metodu.", *Doktora Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2009).
- [45]. Girgin Z., Yılmaz Y. and Demir E. "A Combining Method for solution of nonlinear boundary value problems.", *Applied Mathematics and Computation*, 232: 1037-1045, (2014).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



## Experimental and Finite Element Methods prediction of 3D printed material mechanical properties with various porosity

*DeneySEL ve sonlu elemanlar yöntemleri 3D baskılı malzemenin çeşitli gözeneklilik ile öngörülmesi*

*Yazar (Author): Abdulaziz S. ALABOODI*

*ORCID: 0000-0003-0370-5324*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Alaboodi A. S., "Experimental and finite element methods prediction of 3D printed material mechanical properties with various porosity", *Politeknik Dergisi*, 23(1): 121-127, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.480248

# DeneySEL ve Sonlu Elemanlar Yöntemleri 3D Baskılı Malzemenin Çeşitli Gözeneklilik ile Öngörülmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Abdulaziz S. ALABOODI\***

Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Qassim University, Saudi Arabia

(Geliş/Received : 08.11.2018 ; Kabul/Accepted : 13.03.2019)

## ÖZ

Bu makalede, belirli geometriye sahip modellerin elastik modülü ve akma dayanımı değerlendirilmiştir. Bunun için deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. Üretilen modeller, bir pres altında sıkıştırma testine tabi tutulmuş ve ANSYS programında ise analiz (FEA) edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, mukavemet, süneklik, ve kilo kaybı açısından en uygun gözeneklilik yüzdesinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Sonuçlar n kuvveti, süneklik ve ağırlık azaltmayı koruyan uygun gözeneklilik yüzdesini değerlendirmek için kullanılmıştır. Dayanıklılık, elastik ve plastik modül verimi, porozitenin artmasıyla azalmıştır. En önemli değişiklik elastik modülünde ortaya çıkmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Porozite, 3D yazıcı, sonlu elemanlar analizi.

## Experimental and Finite Element Methods Prediction of 3D Printed Material Mechanical Properties with Various Porosity

### ABSTRACT

In this article, elastic modulus and yield strength of models with specific geometry are evaluated. Experimental and theoretical studies were carried out. Produced models were subjected to compression test under one press and analysis (FEA) in ANSYS program. The results were used to determine the most suitable porosity in terms of strength, ductility, and weight loss. The results were used to assess the percentage of proper porosity that protects the force, ductility and weight reduction. Durability, elastic and plastic module yield decreased with increasing porosity. The most important change occurred in the elastic modulus.

**Keywords:** Porosity, 3D printer, finite element analysis

### 1. INTRODUCTION

Porosity in materials takes different shapes and geometry. It is noticed in biomaterial such as bones and natural material such as sponges, and it could be fabricated as an artificial material. An example of artificial porous material is bone replacement material. The impeded porous structure during bone scaffold fabrication is essential. Several methods have been developed to reach the porous formation in scaffold. These methods include freeze drying, gas forming, phase separation, or solvent casting particulate leaching. These methods are simple and common due to their simplicity; however, they introduce organic solvents to dissolve synthetic polymers which create significant problems. Furthermore, the dimensional control in scaffold specifications such as pore size, pore shape, pore interconnectivity, and pore distribution are the main concerns of these procedures[1].

The most important parameters of porous material such as the size of the pore and the joining were discussed and reported. The deformation of a porous titanium with low

porosity has been investigated via plane strain two dimensional and three-dimensional finite element models[2]. They have simulated the material microstructure of a porous material with 15% porosity. They have concluded that the 3D models of macroscopic response had agreed with the theoretical and experimental results. Although the 3D model's microscopic response had predicted a higher mean of equivalent plastic strain and Von Mises stress than the 2D models. An FEM model has been built corresponding to an open-cell foam solid geometry for simulating the behavior of material in the micro-tension[3]. The steps of modelling start through image analysis, then 3D reconstruction, and then the transformation of the STL file format to solid model imported to the FE package (ANSYS). The shear stress distributions of scaffolds have been investigated using the numerical methods[4]. They have prepared the scaffolds by salt leaching with different geometric specifications. Then the 3D structure obtained using micro-computed tomography. Moreover, they modelled the flow of osteogenic media through the scaffolds by the lattice Boltzmann technique. The fluid flow in single-phase and solute transport have been modeled using FEA and 3D pore geometries which were

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-mail : alaboodi@qec.edu.sa



obtained experimentally[5]. Three forms of scaffolds were designed and fabricated via a 3D printing system rapid prototyping technology[6]. An alternative method for investigating and analyzing the mechanical behavior of the structure of bone trabecular have been developed to assist physicians in drug treatment, diagnosis, and monitoring [7]. The bovine bone mechanical properties and three metallic foam materials have been studied using a compression test machine, micro-focus computed tomography, and finite element modelling[8]. The analysis of variance (ANOVA) and finite element methods (FEM) have been presented to investigate the spherical and ellipsoidal voids inside polymer materials[1]. They have found that the initial void, volume fraction, and stress tri-axiality were the most influential parameters. The mechanical behavior characteristics have been evaluated for hydroxyapatite (HA) material induced via bone ingrowth in a rabbit [10]. Their results showed that the internal microstructures influenced the mechanical properties and development of bone regeneration with the time period of implantation. The computational study has been proposed for the mechanical behavior of HA-nanocomposites reinforced with graphene nanosheet and CNT[11]. The effects of void and porosity size have been investigated on effective elastic properties using random fields and finite element 3D models[12]. The parametric optimization technique using the design of experiments have been developed to estimate the 3D printing ability for fabricating scaffold models of calcium sulfate-based[13].

The parameters of 3D printing used in their study were time between two layers, layer thickness, orientation of the product, porosity, mechanical stiffness, and dimensional accuracy by the design of experiments. Honeycomb-like metallic glass (MG) models were fabricated with several relative densities[14]. Their results showed that the 3D-MGs provided high elasticity which was better than ceramics and conventional metals. Numerical and experimental approaches have been used to study the 3D microstructural mechanical performance and failures of 3D printed parts of acrylonitrile butadiene styrene material[15]. They have introduced a structural satisfaction of mechanical criteria up to a certain percentage of porosity. A porous pure Ti samples with different porosities percentage have been fabricated by a laser engineered net shaping method[15]. They have evaluated the mechanical properties of samples using compressive loading. In addition, they have used finite element analysis to study the behavior of the sample's deformation.

The objective of this research was to introduce 3x3x3 cells of porous material that satisfy some conditions. The proposed model could prevent the longitudinal porous cavity by using multidirectional cavities to create obstacles to the crack propagation and to ensure the uniform fluid flow inside the porous cavity material as a web canal. The main objectives of this research are studying the effect of porosity percentage on the mechanical properties of selected material and geometry

using experimental methods. In addition, the effect of porosity percentage on the mechanical properties of selected material and geometry using finite element (FE) method. Then comparing the FEM and experimental results.

## 2. MODELING

The porosity contains three elliptical cylinders oriented on three main directions on the reverse of the Cartesian coordinate. The dimensional parameter was the projection circle radius. By varying the radius, the porosity percentage would change correspondingly. The porosity was the ratio of material of solid volume to the total volume. The proposed model could prevent the longitudinal porous cavity by using multidirectional cavities to create obstacles to the crack propagation and to ensure the uniform fluid flow inside the porous cavity material as a web canal. Some researchers developed porous models with regular and symmetry geometry of porosity. The major benefit of regular porosity geometry modeling is to have variable parameters suitable to be optimized. The porous model should be capable to transmit fluid through the porous material with uniform distribution.

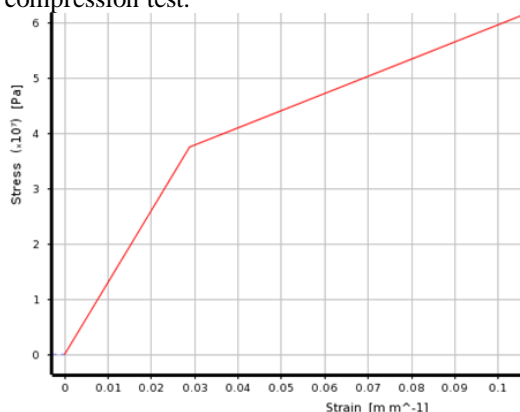
The introduction of porosity would variate its mechanical properties: the elastic modulus, yield strength, and ultimate strength. The 3D matrix model has been developed using a single cell joined together in all the three directions. The matrix configuration (arrangement) between cells is side by side; FE methods would utilize to investigate the cells matrix by introducing a fixed lower side and applying a fixed displacement to the upper side. The direction of displacement is downward that indicates compression load. The applied displacement has been used to overcome the elastic region and to take a portion of the plastic region. Thus, it can estimate the elastic modulus and the yield strength for each set of the cube length by running the model simulation and calculating the maximum strength intensity factor. Further, the model has been used for studying the effect of variation in the single cell parameters and the volume ratio with the maximum strength intensity factor using the side-by-side and mirror matrix configurations. The main objective of this study is to design specific geometry to achieve some properties in the three directional with regular and non-straight porosity channels.

The porosity contains three elliptical cylinders oriented on three main directions in the reverse of the Cartesian coordinates. The dimensional parameter is the projection circle radius. By varying the radius, the porosity percentage will change correspondingly. The fabricated models include a regular shape with certain dimensional parameters. The porosity contains three elliptical cylinders oriented on three main directions in the reverse of the Cartesian coordinate. This model allows any liquid to flow with uniform distribution and transmit through the pore's media. A different configuration with different

orientation of the single model cell would introduce a different collection of models.

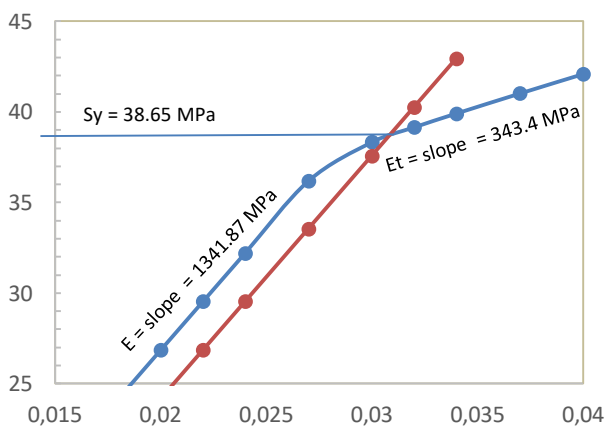
**2.1 Material Modeling**

The material used in this paper is metallic plastic [Nylon Plastic filled with Aluminum dust]. It is easy to be used in a 3D printer with good dimensional accuracy. The mechanical properties of the sheet of material delivered from the material provider is not similar to the material produced by 3D printer depending on the printing parameters, adhesive, additive, and other parameters. Thus, it is necessary to take a specimen without porosity to test it and obtain its mechanical properties using a compression test.



**Figure 1.** Yield Strength Verse Porosity with exponential fit

Figure 1 stress strain curve o the material selected to be investigated. Figure 2 shows the method of predicting the yield strength from the stress strain curve. Similarly, the calculation of yield strength, elastic, and plastic modulus is given below:



**Figure 2.** Mechanical Properties estimation of bulk material.

The elastic modulus  $E$  (MPa) of each model was defined as in equation (1):

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \left(\frac{F}{A}\right) \left(\frac{L}{\Delta L}\right) \quad (1)$$

where  $F$  (N) is the compressive force,  $A$  (mm<sup>2</sup>) is the surface area of load,  $\Delta L$  (mm) the longitudinal deformation, and  $L$ (mm) is the length of the cube.

$$n \frac{L}{A} = constant \quad (2)$$

Where:

$$A = (L)^2 - n (\pi r^2), \text{ for, } n = \text{number of circles.}$$

The amount of deformation  $\Delta L$  was determined as the average axial displacements of all nodes on the loaded surface. In the first step, the pore size of four FE models was increased and the resulting scaffold porosity was calculated according to Eq. 3:

$$Porosity = (1 - Ve/Vo) \times 100\% \quad (3)$$

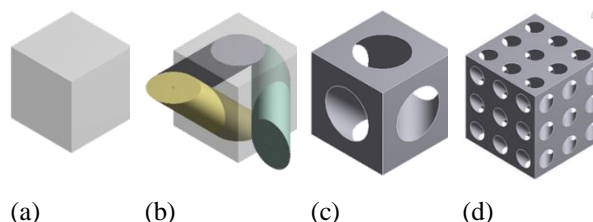
where  $V_o$  is the overall volume enclosed by the outer periphery and  $V_e$  is the effective volume of the scaffold struts. The effective volume was also evaluated using ANSYS software for each case. The ratio of the solid volume of the material to the total volume should be in the range of 80-90% to mimic the real bon volume ratio. The porosity should be in the range of 10-20%, while in this model extended to be 0-55% to include further range for comparison. The proposed model should prevent the longitudinal porous cavity by using zigzag hollows to create obstacles to the crack propagation and to ensure the uniform fluid flows inside the porous cavity material by using web canals. Here, the 3D matrix was formed by introducing a single cell in all the three direction. The matrix configuration (arrangement) between cells is side by side. For the metallic-plastic with plastic-elastic properties can be characterized by the essential properties using SLM. The Young’s modulus of mean average for metallic-plastic are shown in Table 1. The room temperature was the choice for the model simulation.

**Table 1.** Metallic plastic bulk mechanical properties

Property	Value
Young's Modulus (E) MPa	1301.44
Poisson's Ratio	0.33
Yield Stress MPa	37.50
Plastic Modulus MPa	310.70

**2.2 Geometric Modelling**

The model includes a regular shape with certain dimensional parameters. The porosity contains three elliptical cylinders oriented on three main directions on the reverse of the Cartesian coordinate as in Figure 3. This model allows any liquid to uniform distribution flow and transmit through the bone bourse media. A different configuration with different orientation of the single model cell would introduce a different collection of models.

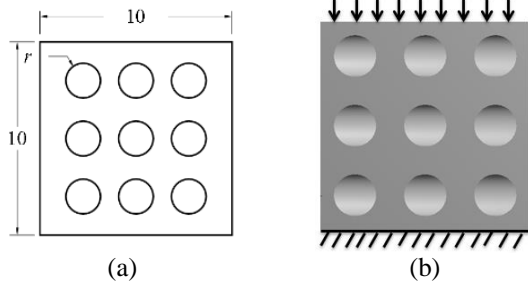


**Figure 3.** Cube (a), with cylindrical cavities (b), subtracted through the six faces (c), 3x3x3 matrix (d)

**2.3 FINITE ELEMENT MODELING**

Finite element methods were also used here to investigate the cells matrix by introducing a fixed lower side and applying a fixed displacement to the upper side as illustrated in Figure 4. The direction of displacement is downward and that indicates compression load. The applied displacement could be used to overcome the elastic region and to take a portion of the plastic region. Thus, we can estimate the elastic modulus and the yield strength for each set of the cube length by running the model simulation and calculating the maximum strength intensity factor. Further, it was aimed here for studying the effect of variation in the single cell parameters and the volume ratio with the maximum strength intensity factor using the side-by-side and mirror matrix configurations.

The process of simulating the compression on the cubic is done through finite element analysis software. All finite element analyzing follows the same steps. The ANSYS Workbench Explicit is used as the FEA (finite element analysis) software. In order to validate the simulation results, the calibration test simulation is done so that the results of the simulation and experiment can be compared. The 3D matrix model has been introducing using single cell joined together to be three cells on three directions. The matrix configuration (arrangement) between cells is side by side. Finite Element methods would be utilized to investigate the cells' matrix by introducing a fixed lower side and applying a fixed displacement to the upper side as illustrated in Figure 4.



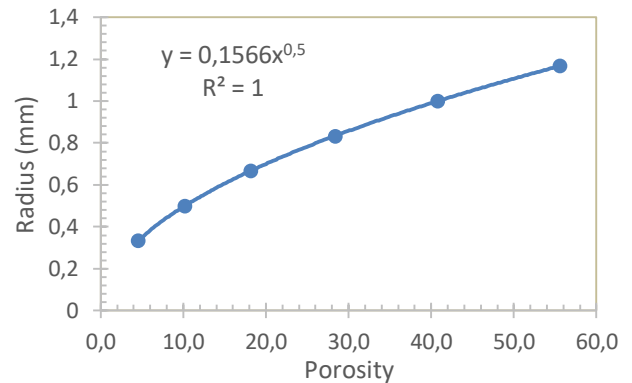
**Figure 4.** 2D views of the 3x3x3 cells Model showing dimension (a), and boundary condition (b).

The exact volume could be attained by extracting the cavities. Then the porosity was calculated. Table 2 shows the side circular radius, circular cross-sectional area, volume, and porosity of each cube.

**Table 2.** Radius of circular cross section area, Volume and porosity of each sample

Radius mm	C.S. Area mm <sup>2</sup>	Volume mm <sup>3</sup>	Porosity %
0	100	1000.0	0.0
2/6	96.86	954.7	4.5
3/6	92.93	898.0	10.2
4/6	87.43	818.7	18.1
5/6	80.36	716.7	28.3
6/6	71.71	592.1	40.8
7/6	61.50	444.8	55.5

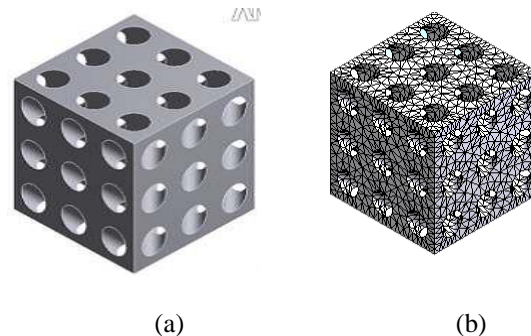
The relation between radius and porosity fits exactly as a power equation as shown in Figure 5.



**Figure 5.** Relation between the circle cross sectional radius and porosity %

The direction of displacement is downward, that indicates compression load. The applied displacement will be used to overcome the elastic region and to take a portion of the plastic region. Thus, we can estimate the elastic modulus and the yield strength for each set of the cube length. We can run the model simulation and calculate the maximum strength intensity factor, study the effect of variation of the single cell parameters and the volume ratio with the maximum strength intensity factor using the side-by-side and mirror matrix configurations.

The areas which would receive higher amounts of stress, usually have a higher node density than those which experience little or no stress. The tetrahedron method is used to mesh all the models involved in compression on the cube. The mesh size is given the following characteristics: 0.045 mm minimum edge length, coarse relevance center, high smoothing, and slow transitions. The models are meshed using the appropriate elemental size for the problem examined until a certain mesh size with very small variation results. Figure 6 shows the 3D cubic porous solid model and the mesh of the cube.



**Figure 6.** 3x3x3 matrix of the single cell to produce (a) 3D cubic porous solid model and (b) mesh of the cube matrix

**3. RESULTS AND DISCUSSION**










Samples were selected for a compression test to investigate the effect of porosity on the mechanical

properties (yield strength, elastic modulus, and plastic modulus). All of the samples were printed via the 3D printer using metallic plastic material as a cube with a 10 mm edge. The first sample was bulk without porosity.

**3.1 Experimental Results**

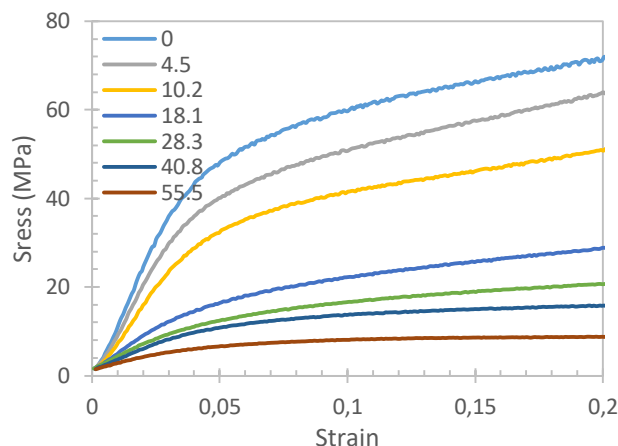
After preparing the samples with variable porosity (0-55%), the compression test was performed to identify the mechanical properties variation with the variation porosity. Table 3 shows the variation of porosity, 3D CAD model, 3D printed samples, and the sample after deformation.

**Table 3.** Porosity, 3D CAD model, 3D printed samples, and the sample after deformation

Porosity %	3D-CAD Model	Printed sample	After Deformation
0			
18.1			
55.5			

The selected mechanical properties were elastic, plastic modulus and yield strength. Figure 7 illustrated the different stress-strain curves with the variation of porosity using a compression test machine. It was observed that the compressive flow stress-strain curves started to decrease gradually as the porosity of the sample increased up to the sample having a porosity of 10.2 and then it started to decrease drastically beyond the value of porosity of 10.2%. Further, it was observed here that three scaffolds samples having a porosity of 0, 4.5, and 10.2% underwent elastic displacement initially followed by plastic deformation. However, the remaining three samples having a porosity of 28.3%, 40.8%, and 55.5% exhibited little elastic deformation compared to other samples, and these samples were undergoing constant plastic deformation without increasing stress. These results explained that the internally modified sample structures had significantly influenced the mechanical properties of the 3D printed samples. Furthermore, it can be observed that the yield strength, elastic modulus, and plastic modulus started to decrease considerably as the percentage of porosity increased up to 10.2%, and then

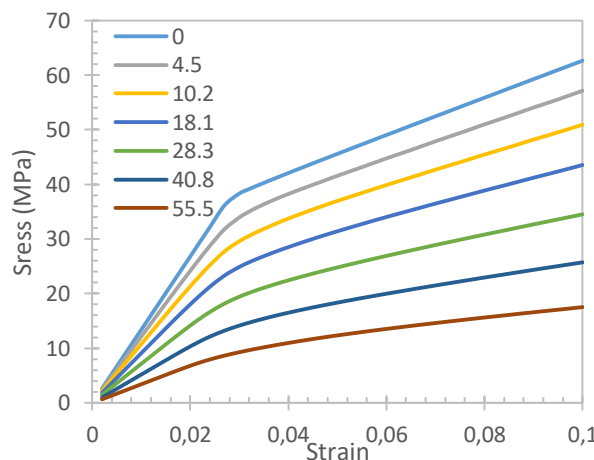
these mechanical properties were decreased drastically beyond the 10.2% porosity level in the sample structure. Therefore, it can be concluded here that the samples of 4.5% and 10.2% porosity can be considered for fabrication of implant scaffold bones which has some benefits by the pore's formation in the structures and consequently it can help biologically. Among all the samples investigated here, the 3D printed 4.5% porosity sample can select the optimum one which can be suggested for medical industries.



**Figure 7.** Stress-Strain Curves Using Different Porosity (Experimental Results)

**3.2 Finite Element Results**

Using the mechanical properties obtained from experimental results of the bulk cube compression test from table 1, the finite element package (ANSYS) was utilized to simulate the compression test with variable porosity and similar dimensions of the experimental cube. Figure 8 simulated stress strain curves were illustrated using various porosity. It was shown here that for each curve, it showed line with two slopes and an inclination between them. The first slope indicates the elastic modulus and the second slope for plastic modulus and the inclination points indicate the yielding strength.



**Figure 8.** Stress-Strain Curves Using Different Porosity (FE Results)

The yield strength versus porosity curve was drawn and the same is shown in Figure 9. The polynomial with the second order fit was used with a good R-square of 0.9981. It showed that the yield strength decreased with an increase in porosity. From zero porosity to 25%, the yield strength was decreased by 18 MPa, whereas it was decreased by only 10 MPa from 25 to 50% of porosity.

At the previous sections, the results of the experimental and finite elements methods were illustrated and described. In this section, the comparison between the two methods results will be introduced. Using the second order polynomial fit, the results of the two methods were drawn in Figure 10. The curves converge at the ends while it diverges at the middle. The maximum variance between the two methods is around the porosity of 25%, which is a reach of about 10 MPa. Similar behavior on the elastic modulus results in Figure 11 and plastic modulus results with errors of 400 MPa and 100 MPa respectively at 35% porosity of both.

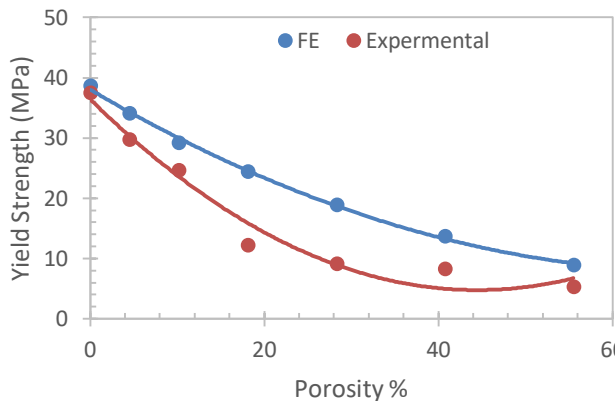


Figure 9. Yield Strength vs Porosity % (FE and Experimental Results)

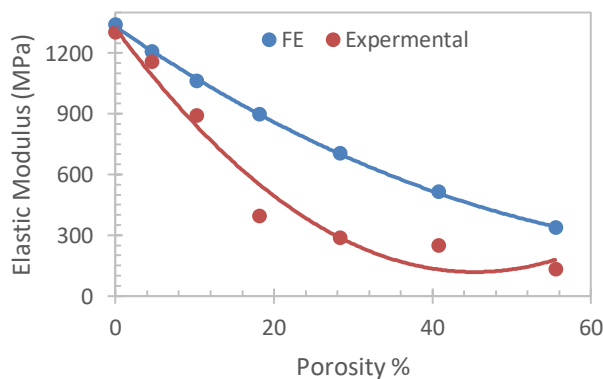


Figure 10. Elastic Modulus vs Porosity % (FE and Experimental Results)

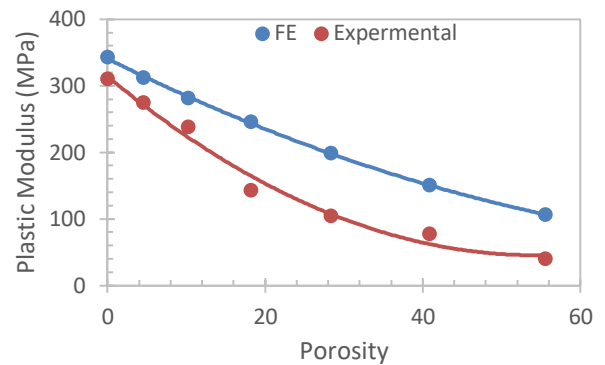


Figure 11. Plastic Modulus vs Porosity % (FE and Experimental Results)

The experimental and finite element results have shown a similar trend with a good polynomial second order fit. The two methods showed agreements at and near the end of the two curves while it diverge at the middle. The reasons of error are that there are many parameters controlling the experimental results such as printing parameters, conditions of materials and adhesive materials, temperature and grains, and grain boundaries with different porosity that were not considered in the finite elements methods. In general, and because of those parameters, the finite elements methods showed results with higher values than the experimental results.

#### 4. CONCLUSION

A simple and effective representation of geometry for regular porous material modelling was proposed using experimental and finite element simulation to investigate the porosity in material and its mechanical properties. Compression load was applied to the top surface of the model using gradual displacement downward from the y-axis. The lower surface was fixed from any movement. Displacement range was chosen to guarantee the model which accomplished full elastic region and portion of the plastic region. The yield strength, elastic, and plastic modulus was evaluated with the variation of the porosity using the same geometry. The experimental and finite elements results show a small variation. The variation increased on the medium range of porosity and decreased for small and large porosity. The most important mechanical property is the yield strength which is decreased with the increase of porosity with approximately half the value.

#### REFERENCES

- [1] Alaboodi, A. S., and S. Sivasankaran. "Experimental design and investigation on the mechanical behavior of novel 3D printed biocompatibility polycarbonate scaffolds for medical applications." *Journal of Manufacturing Processes* 35: 479-491, (2018).

- [2] Shen, H., and L. C. Brinson. "Finite element modeling of porous titanium." *International Journal of Solids and Structures* 44(1): 320-335, (2007).
- [3] N. Michailidis, F. Stergioudi, H. Omar, D. Tsipas, "FEM modeling of the response of porous Al in compression", *Computational Materials Science* 48: 282–286, (2010).
- [4] Roman Voronov, Samuel VanGordon, Vassilios I. Sikavitsas, Dimitrios V. Papavassiliou, "Computational modeling of flow-induced shear stresses within 3D salt-leached porous scaffolds imaged via micro-CT", *Journal of Biomechanics* 43: 1279–1286, (2010).
- [5] Yan Zaretskiy, Sebastian Geiger, Ken Sorbie, Malte Förster, "Efficient flow and transport simulations in reconstructed 3D pore geometries", *Advances in Water Resources* 33: 1508–1516, (2010).
- [6] Su A Park, Su Hee Lee, Wan Doo Kim, "Fabrication of porous polycaprolactone/ hydroxyapatite (PCL/HA) blend scaffolds using a 3D plotting system for bone tissue engineering", *Bioprocess Biosyst Eng*, 34: 505–513, (2011).
- [7] L. Podshivalov, A. F.-Y., "3D hierarchical geometric modeling and multiscale FE analysis as a base for individualized medical diagnosis of bone structure", *Bone* 48: 693–703, (2011).
- [8] T. Guillén, Q.-H. Z.-J., "Compressive behaviour of bovine cancellous bone and bone analogous materials, microCT characterisation and FE analysis", *Journal of the Mechanical Behaviour of Biomedical Materials*, 4: 1452–1461, (2011).
- [9] Andrea Spaggiari, Noel O’Dowd, "The influence of void morphology and loading conditions on deformation and failure of porous polymers: A combined finite-element and analysis of variance study", *Computational Materials Science* 64: 41–46, (2012).
- [10] Li-Mei Ren, M. T. "A comparative biomechanical study of bone ingrowth in two porous hydroxyapatite bioceramics", *Applied Surface Science*, 262: 81-88, (2012).
- [11] Kristopher Doll, Ani Ural, "Mechanical Evaluation of Hydroxyapatite Nanocomposites Using Finite Element Modeling", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 135: 011007-1, (2013).
- [12] Jumpol Paiboon, D.V. Griffiths, Jinsong Huang, Gordon A. Fenton, "Numerical analysis of effective elastic properties of geomaterials containing voids using 3D random fields and finite elements", *International Journal of Solids and Structures* 50, 3233–3241, (2013).
- [13] Mitra Asadi-Eydivand, Mehran Solati-Hashjin, Arghavan Farzad, Noor Azuan Abu Osman, "Effect of technical parameters on porous structure and strength of 3D printed calcium sulfate prototypes", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 37: 57–67, (2016).
- [14] Ze Liu, Wen Chen, Josephine Carstensen, Jittisa Ketkaew, Rodrigo Miguel Ojeda Mota, James K. Guest, Jan Schroers, "3D metallic glass cellular structures", *Acta Materialia* 105: 35e43, (2016).
- [15] O. B. Hassana, S. Guessasma, S. Belhabib, and H. Nouri, "Explaining the Difference Between Real Part and Virtual Design of 3D Printed Porous Polymer at the Microstructural Level", *Macromol. Mater. Eng.*, 301: 566–576, (2016).
- [16] Sandipan Roy, Niloy Khutia, Debdulal Das, Mitun Das, Vamsi Krishna Balla, Amit Bandyopadhyay, Amit Roy Chowdhury, "Understanding compressive deformation behaviour of porous Ti using finite element analysis", *Materials Science and Engineering C*, 64: 436–443, (2016)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Baş plaka fantomunda kullanılan biyomalzemelerde oluşan ikinci pikin proton bragg pikine etkisi

*The effect of the second peak formed in biomaterials used in a slab head phantom on the proton bragg peak*

Yazar(lar) (Author(s)): Fatih EKİNCİ<sup>1</sup>, Mustafa Hicabi BÖLÜKDEMİR<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-1011-1105

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-7911-7863

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article):** Ekinci F. ve Bölükdermi M.H., “Baş plaka fantomunda kullanılan biyomalzemelerde oluşan ikinci pikin proton Bragg pikine etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 129-136, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.523001

# Baş Plaka Fantomunda Kullanılan Biyomalzemelerde Oluşan İkinci Piki Proton Bragg Pikine Etkisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Fatih EKİNCİ<sup>1</sup>, Mustafa Hicabi BÖLÜKDEMİR<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 06.02.2019 ; Kabul/Accepted : 12.03.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada Monte Carlo benzetimi ile biyomalzemeli baş plaka fantomunda terapötik enerji aralığında kalan 160-220 MeV'lik protonların Bragg eğrileri hesaplanmıştır. Biyomalzeme olarak Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V, Co-Ni-Cr-Mo, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Paslanmaz Çelik, Nital, Vitallium ve Teflon seçilmiş, biyomalzeme türünün ve kalınlığının Bragg eğrisi üzerine etkisi incelenmiştir. Protonlar az yoğunundan daha yoğun bir katmana geçerken Bragg eğrisinde ikinci bir pik oluşur. Baş-plaka fantomunda ikinci pik ve genliğinin Bragg piki üzerine etkisi de incelenmiştir. Kortikal kemik kalınlığı arttıkça Bragg piki konumunun % 0,47-3,3 arasında azaldığı görülmüştür. Proton enerjisi arttıkça ikinci piki genliğinin ve Bragg pik konumuna etkisinin azaldığı görülmüştür. Kullanılan biyomalzemeler içerisinde kortikal kemiğe en yakın biyomalzemenin teflon olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Proton tedavisi, biyomalzeme, bragg piki, baş plaka fantomu.

# The Effect of the Second Peak formed in Biomaterials used in a Slab Head Phantom on the Proton Bragg Peak

## ABSTRACT

In this study, Bragg curves of 160-220 MeV protons in the therapeutic energy range were calculated with Monte Carlo simulation. Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V, Co-Ni-Cr-Mo, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Stainless Steel, Nital, Vitallium and Teflon were selected as biomaterials and the effect of biomaterial type and thickness on Bragg curve was investigated. A second peak is formed when protons pass from a less dense to a denser layer. The effect of the second peak and amplitude on the Bragg peak is also investigated in the slab head phantom. It has been seen that as the cortical bone thickness increases, the Bragg peak position decreases by 0.47-3.3%. As the proton energy increased, the amplitude of the second peak and the effect of the Bragg peak position decreased. The biomaterial which gives the closest results to the cortical bone among the biomaterials used was found to be Teflon.

**Keywords:** Proton therapy, biomaterial, bragg peak, slab head phantom.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Protonların radyoterapide kullanımı ilk defa 1946'da Robert Wilson tarafından önerilmiştir [1]. Lawrence ve ark. protonların tedavi amacıyla kullanılması için ilk araştırmalara 1954'de başlamıştır [2]. Protonların ilk hasta temeli çalışmaları 1990'da Loma Linda Üniversitesinde başlanmıştır [3].

Proton pozitif yüklü ağır bir parçacık olduğundan madde içinde ilerlerken küçük açılarla saçılma yaparak enerjisini yavaş fakat sürekli kaybeder. Bragg piki protonların enerji kaybetme hızının en yüksek olduğu yerde oluşur. Tümör hacminden dolayı sadece tek enerji değerli proton demetinin hedefe gönderilmesi yetersiz kalmaktadır. Dolayısıyla değişik enerjilerdeki proton demetlerinin hedefe gönderilmesi gerekir [4]. Carlsson ve ark. 1997'de 50-250 MeV enerjili protonlar için suda Bragg eğrilerini Monte Carlo PTRAN kodu programı ve analitik hesap yöntemiyle hesaplamış Bragg piki

konumlarını bulmuştur [5]. Hall ve ark.1978'de 160 MeV enerjili protonlar için suda Bragg eğrilerini Harvard siklotron hızlandırıcısında çalışmış, Bragg piklerini bulmuşlardır [6]. Li ve ark. 2005'de 120-250 MeV enerjili protonların Bragg eğrilerini Monte Carlo kodlu Geant3 benzetim programı yardımıyla hesaplamış, Bragg piklerini bulmuşlardır [7]. Seravalli ve ark. 2012'de 90-200 MeV enerjili protonların Bragg eğrilerini su fantomda Monte Carlo kodlu FLUKA, GATE, MCNPX ve PHITS benzetim programları yöntemiyle hesaplayıp Bragg piklerini bulmuşlardır [8].

Kranyoplasti uygulaması, kafatasında farklı birçok nedenle eksik veya kusurlu olan kemik parçasının cerrahi yöntemle tekrar yerine yerleştirilmesi veya oraya uygun başka bir biomalzeme ile giderilmesidir [9, 10]. İdeal kranyoplasti materyali, ısıya dayanıklı, biyomekanik olarak uygun, ucuz, dokular ile uyumlu olup komplikasyona sebep olmayan, kortikal kemikle yaklaşık eşit ağırlıkta, kanserojen olmayan ve kolayca steril edilip kusurlu kısmı tam oturarak kapatan

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : bolukdemir@gmail.com

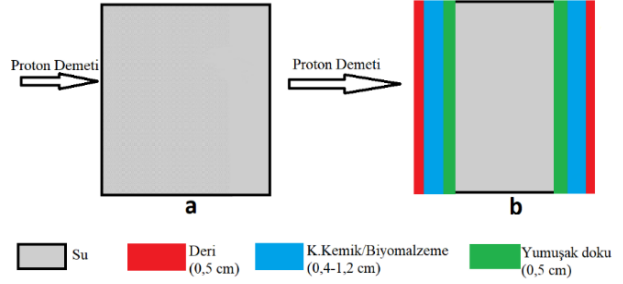


özelliklerde olmalıdır [11]. Seramik kullanımı kranyoplasti uygulamalarında oldukça yenidir [12].  $Al_2O_3$  seramik biyomalzeme yaygın olarak kullanılmaktadır [13, 14]. Minimal korozyon özelliği olan vitallium (Co-Cr-Mo) diş implantı olarak kullanılmaktadır [15]. Bileşik biyomalzemelerin saf biyomalzemelere göre çok az doku komplikasyonu verdiğini gösteren hayvanlarda yapılan uygulamalardan sonra, vitallium kranyoplastide çok kullanılmaya başlanmıştır [10, 16]. Titanyum ve alaşımları (özellikle  $Ti_6Al_4V$  ve  $TiNi$ ) mekanik, yüksek dirençli korozyon ve biyouyumluluk özelliklerinden dolayı ortopedik uygulamalarda yoğun olarak kullanılmaktadır [17-19]. Teflon biyomateryali polimerik özelliğe sahip olmasından dolayı başlıca vasküler alanda olmak üzere sıklıkla kullanılmaktadır [20, 21]. Co-Ni-Cr-Mo alaşımı korozyon direncinin çok iyi olması, kırılma olasılığı olan ve stres yoğunluklu bölgelerde uzun ömürlü olmasından dolayı sıklıkla kullanılmaktadır [22]. Metalik özellikli biyomalzeme olan paslanmaz çelik farklı kemik kusurlarının giderilmesi işlemlerinde genellikle kullanılmaktadır [23].

İnsan vücudu büyük oranda su içerdiğinden radioterapi planının doğrulukla yapılabilmesi için su fantom hesaplamaları önemlidir. Proton demeti su molekülünü oluşturan hidrojen ve oksijen atomlarının yörünge elektronlarıyla Coulomb etkileşmesi yaparak enerjisini adım adım ve sürekli kaybeder [24]. Bu çalışmada, su fantomu için 160, 180 ve 200 MeV'lik protonların Bragg eğrileri hesaplanıp, literatürdeki benzer hesaplamalarla karşılaştırılmıştır. Sonuçların kabul edilebilir sapma değerleri içinde olduğu görülmüştür. Son olarak, kortikal kemik yerine biyomalzeme olarak kullanılan ve kullanıma potansiyeli olan  $Ti_6Al_4V$ , Co-Ni-Cr-Mo,  $Al_2O_3$ , Paslanmaz Çelik (Fe-Ni-Cr), Nital (TiNi), Vitallium (Co-Cr-Mo) ve Teflon (F-C) için Bragg eğrileri ve pik konumları elde edilmiştir. Kortikal kemik kalınlığının yaşa, cinsiyete ve genetiğe göre değişim aralığı göz önüne alınarak bu malzemeler için 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 ve 1,2 cm kalınlıklar dikkate alınmıştır. Kortikal kemik sonuçları ile biyomalzemelerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Protonların hedef materyal içindeki Linear Enerji Transferi (LET) hesaplamaları Monte Carlo tabanlı TRIM (TRAnsport of Ions in Matter) benzetim programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. TRIM, iyon-atom çarpışmaları için kuantum mekanişsel yöntemleri kullanarak hedef içinde iyonların durdurma gücünü ve menzillerini hesaplayan bir programdır. TRIM, iyonizasyon başta olmak üzere iyonların enerji kayıp süreçleri ile ilgili bütün kinetik olayları hesaba katar [25].



Şekil 1. a) Su fantomu, b) kortikal kemik veya biyomalzeme için baş-plaka fantom kesiti ( a) Water phantom, b) A slab head phantom section for cortical bone or biomaterials)

Hesaplamalarda istatistiki sapmalar kabul edilebilir sınırlar içinde olacak şekilde proton demeti ( $10^5$  proton) hedefe gönderilmiştir. Şekil 1.'de gösterildiği gibi hesaplamalar iki durum göz önüne alınarak yürütülmüştür. Birincisi su fantomu, ikincisi insan baş fizyolojisi dikkate alınarak kortikal kemik ve kortikal kemik yerine kullanılan biyomalzemeleri içeren baş plaka kesitidir. Deri ve yumuşak doku için SRIM veri tabanındaki özellikler kullanılarak 0,5 cm sabit kalınlık alınmıştır. ICRU 44 raporunda suyun yoğunluğu  $1,0 \text{ g/cm}^3$  ve beynin yoğunluğu  $1,03 \text{ g/cm}^3$  olduğundan hemen hemen benzer olduğu bildirilmiştir [4]. Bu nedenle hesaplamalarda beyin yerine su dikkate alınmıştır. Kortikal kemik ve biyomalzemeler için kalınlık 0,4-1,2 cm aralığında 0,2 cm aralıklarla artırılmıştır. Kortikal kemik ve biyomalzemelerin atomik yüzdeleri, atomik yoğunlukları ve yoğunlukları

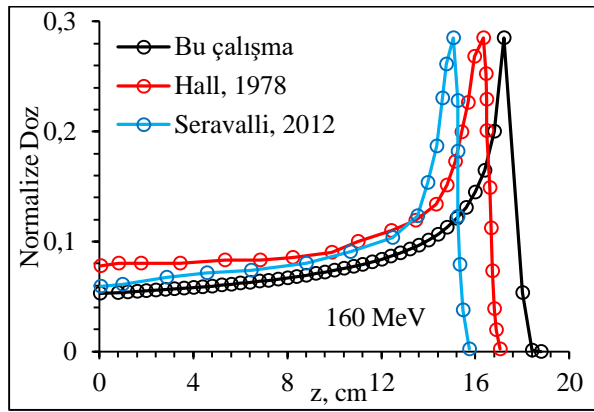
Çizelge 1. Kortikal kemik ve biyomalzemelerin atomik yüzdesi, atomik yoğunluğu ve yoğunluğu [25] (Atomic percentage, atomic density and density of cortical bone and biomaterials)

Biyomalzeme	Atomik yüzde (%)	Atomik yoğunluk, $\times 10^{22}$ atom/cm <sup>3</sup>	Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>
K. Kemik	H 3,4; O 43,5; C 15,5; N 4,2; S 0,3; Ca 22,5; P 10,3; Mg	9,946	1,920
Teflon	C 33,3; F 66,6	7,599	2,200
$Ti_6Al_4V$	Ti 64,3; Al 24,1; V 11,4	6,175	4,429
$Al_2O_3$	Al 47; O 52,9	10,960	3,970
P. Çelik	Cr 8; Ni 18; Fe 74	8,595	8,000
Vitallium	Cr 30; Mo 5; Co 65	8,673	8,455
Co-Ni-Cr-Mo	Co 36,8; Ni 36,8; Cr 21; Mo 5,26	8,738	8,609
Nital	Ti 49,4; Ni 50,6	7,599	6,733

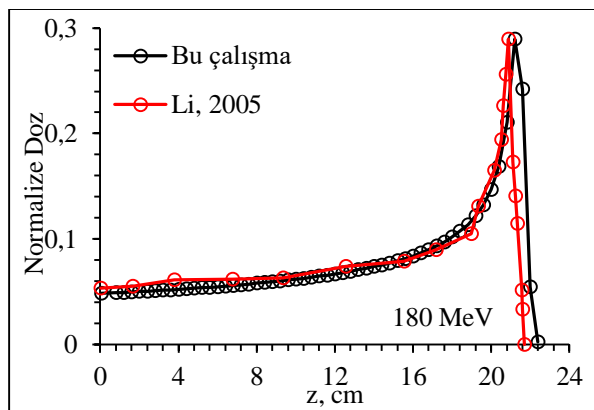
SRIM bileşikler veri tabanından elde edilmiş ve Çizelge 1'de verilmiştir.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Şekil 1a. göz önüne alınarak yapılan çalışma, hesaplamaların literatürle uyumunu göstermek ve doğruluğunu test etmek içindir. Bu nedenle 160, 180, 200 MeV enerjili protonların su fantomu içindeki maksimum doza normalize edilmiş Bragg eğrileri literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırılmıştır (Şekil 2-4). 160 MeV'lik protonların Bragg eğrileri göz önüne alındığında Seravalli ve ark. Monte Carlo kodlu FLUKA, GATE, MCNPX ve PHITS benzetim programları yöntemi ile hesaplama yapmış ve Bragg pikini 15,1 cm olarak bulmuşlardır [8]. Hall ve ark. ise Harvard siklotron hızlandırıcısında deneysel olarak Bragg pikini 16,3 cm bulmuşlardır [6].



Şekil 2. Su fantomunda 160 MeV'lik protonların Bragg eğrileri (Bragg curves of 160 MeV protons in water phantom) [6, 8].

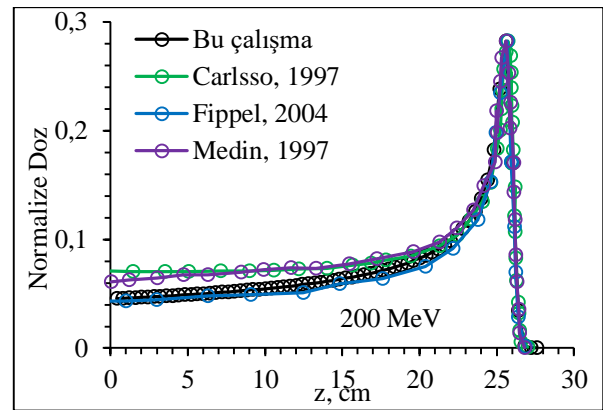


Şekil 3. Su fantomunda 180 MeV'lik protonların Bragg eğrileri (Bragg curves of 180 MeV protons in water phantom) [6, 8].

Bu çalışma ile elde edilen değer ise 17,2 cm 'dir ve referans çalışmalarla sırasıyla % 13,9 ve % 5,5 kadar sapma mevcuttur. İki referans çalışma karşılaştırıldığında ise %7,9 kadar sapma söz konusu

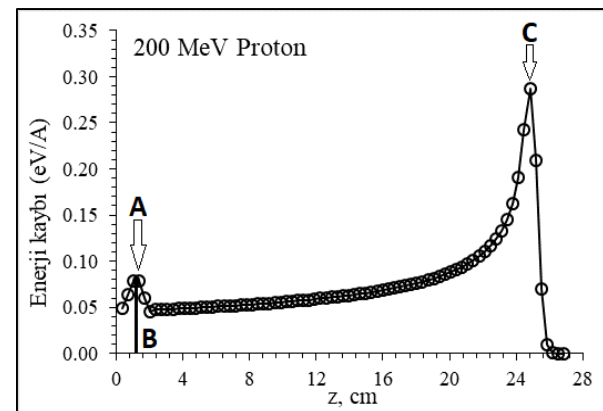
olduğu görülmektedir. Yani, bu çalışmanın deneysel sonuçla uyumu Seravalli ve ark.'nın sonuçlarına göre daha iyidir. 180 MeV'lik protonların Bragg eğrileri göz önüne alındığında Li ve ark. Monte Carlo kodlu Geant3 benzetim programı ile hesaplama yapmış ve Bragg pikini 20,9 cm olarak bulmuşlardır [7]. Bu çalışma ile 180 MeV'lik protonlar için elde edilen değer ise 21,2 cm 'dir ve maksimum % 1,4 kadar sapma mevcuttur.

200 MeV'lik protonların Bragg eğrileri göz önüne alındığında sırasıyla Carlsson ve ark. Fippel ve ark. ve Medin ve ark.'nın elde ettiği Bragg piki değerleri sırasıyla 25,7 cm, 25,7 cm ve 25,6 cm'dir [5,27, 28]. Bu çalışmada elde edilen değer ise 25,6 cm'dir ve sırasıyla % 0,4 ve % 0 kadar sapma mevcuttur.



Şekil 4. Su fantomunda 200 MeV'lik protonların Bragg eğrileri (Bragg curves of 200 MeV protons in water phantom) [6, 8].

Karşılaştırmalar doğrultusunda genelde elde edilen sonuçlardaki farkın kayda değer olmadığı ve medikal alanda kabul edilebilir sınırların (<5%) içerisinde olduğu açıkça görülmektedir. Kabul edilir farkın üzerinde olan sapmalar inhomojenite etkileri ve Monte Carlo tabanlı olasılıkları göz önüne aldığımız da literatürde kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Hesaplarımızın literatürdeki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 5. Bragg eğrisi parametreleri: İkinci pik (A), genliği (B) ve Bragg piki (C) (Bragg curve parameters: Second peak (A), its amplitude (B) and Bragg peak (C))

Baş plaka kesitinde (Şekil 1b) kortikal kemik ve kortikal kemik yerine kullanılan biyomalzemeler için hesaplanan Bragg eğrisi parametreleri Şekil 5.'de verilen A ikincil pik, B ikincil pik genliği ve C Bragg pik değerleridir. İkincil pik, protonların sudan daha yoğun olan kortikal kemik vb. bir bölgeye girmesiyle oluşan bir piktir. Kortikal kemik kalınlığının insanlardaki değişim aralığı göz önüne alınarak bu malzemeler için 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 ve 1,2 cm kalınlıklar göz önüne alınmıştır.

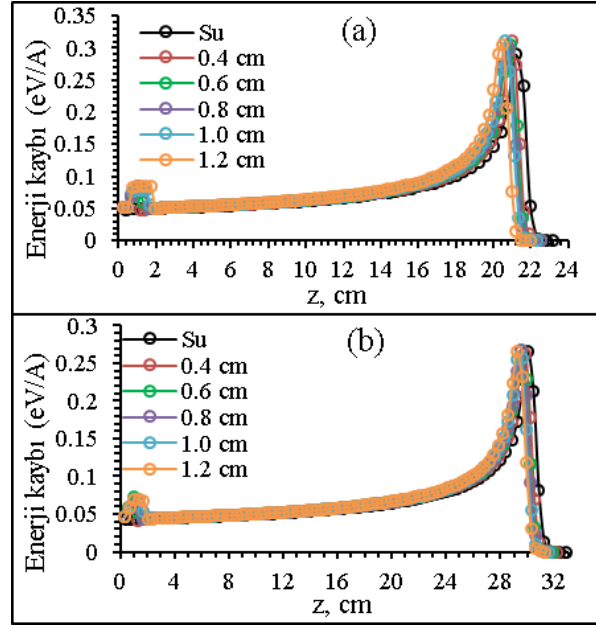
Bragg pikinin suda ve sudan daha yoğun olan kortikal kemikteki davranışının anlaşılması biyomalzemeleri değerlendirebilmemiz için gereklidir. Bu nedenle, Şekil 1a. ve 1b.'deki kesitlere göre bragg eğrileri hesaplanarak bulunan Bragg pik değerleri Çizelge 2.'de verilmiştir. Sonuç olarak, Bragg piki 0,4 cm Kortikal kemik kalınlığında ortalama 0,3 cm azalırken 1,2 cm kalınlıkta ortalama 0,7 cm azalmaktadır. Kortikal kemik kalınlığı arttıkça Bragg pikinde yaklaşık % 0,5-3,3 arasında bir fark oluşmaktadır. Söz konusu hesaplamalar MC doğası gereği bir olasılık içermektedir. Önemli olan sonuçların %5'lik farkın altında çıkması ve tekrar hesaplandığında tutarlılık göstermesidir. Literatürde daha büyük farkların söz konusu olduğu görülmektedir.

Kortikal kemiğin Bragg pik konumundaki azalma ve ikinci pik sonuçlarının Şekil 6.'da 180 ve 220 MeV enerjili Bragg eğrileri grafiğinde gösterilmiştir. Sonrasında yapılan hesaplamaların benzeri seçilmiş bütün biyomalzemeler için tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar ve değerlendirmesi aşağıda verilmiştir.

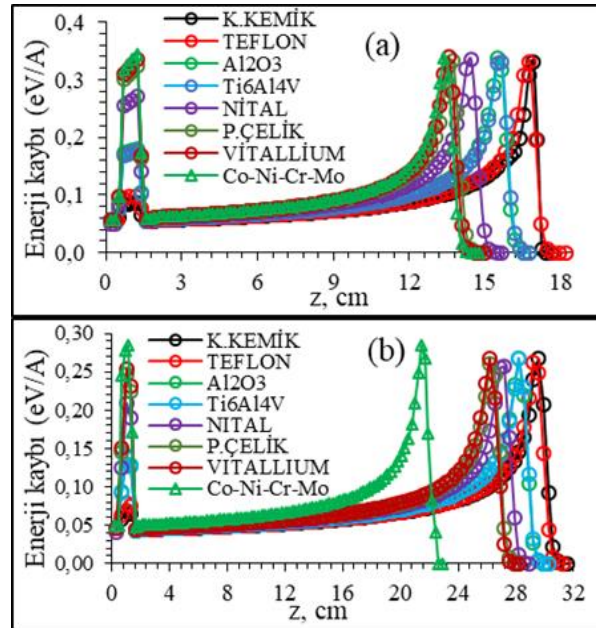
**Çizelge 2.** Şekil 1a ve 1b'ye göre Proton demetinin su ve 5 farklı kalınlıkta kortikal kemik için Bragg pik konumları (Bragg peak positions of the proton beam for water and cortical bone with 5 different thicknesses according to Figure 1a and 1b)

Proton enerjisi, MeV	0cm	0,4cm	0,6cm	0,8cm	1,0cm	1,2cm
160	17,2	17,1	16,9	16,7	16,7	16,7
180	21,2	21,1	20,9	20,8	20,6	20,5
200	25,6	25,2	25,2	24,9	24,8	24,8
220	30,0	29,8	29,5	29,6	29,6	29,2

Seçilen 7 farklı biyomalzeme için protonların Bragg eğrileri Şekil 1b'deki baş-plaka kesiti göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Biyomalzeme kalınlıkları kortikal kemikte olduğu gibi 0,4-1,2 cm aralığında alınmıştır. Elde edilen sonuçlar referans olarak kabul ettiğimiz kortikal kemik değerleri ile karşılaştırılmıştır. Hesaplamalardan elde edilen Bragg pik konumu sonuçları Çizelge 3.'de, ikinci pik ve genlik değerleri Çizelge 4.'de verilmiştir.



**Şekil 6.** a) 180 MeV ve b) 220 MeV enerjili protonların su fantom ve baş-plaka kesiti için Bragg eğrileri (Bragg curves for water phantom and the slab head phantom of a) 180 MeV and b) 220 MeV protons)



**Şekil 7.** 0,8 cm kalınlıklı kortikal kemik ve biyomalzemeli baş-plaka kesiti için a) 160 ve b) 220 MeV enerji protonların Bragg eğrileri (Bragg curves of a) 160 MeV and b) 220 MeV protons for a slab head phantom with 0,8-cm-thick cortical bone and biomaterials)

### 3.1. Bragg Pikleri (Bragg Peaks)

Çizelge 3.'de verilen hesaplama sonuçlarına göre, kortikal kemik ile biyomalzeme sonuçları karşılaştırıldığında, teflonda seçilen her kalınlık için (%

3- 0,4 azalış ile) yaklaşık aynı Bragg pik konumu elde edilmiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ise 0,4 cm kalınlıkta % 2,4-4,7; 0,6 cm'de % 3,1-4,7; 0,8 cm'de % 4-7; 2; 1 cm'de % 5,7-9,6 ve 1,2 cm'de % 6,8-15,6 Bragg piki konumunda bir azalışa sebep olmaktadır. Yani kalınlık arttıkça Bragg pik konumundaki azalma % 0,4'den % 30,5'e kadar uzanmaktadır. Ti6Al4V'de yaklaşık Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e benzer bir davranış sergilemektedir. Yine kalınlık arttıkça % 2'den % 15'e kadar uzanan bir pik konum azalmasına neden olmuştur. Nital ise % 3,6 ile % 22,8'lik bir azalmaya sebep olmuştur. Paslanmaz çelik % 5,4-28,1 arası,

Vitalium % 2-30,2 arası ve son olarak Co-Ni-Cr-Mo % 5,8-30,5 arası bir oranda Bragg piki konumun azalmaya sebep olmuştur. Genel olarak aynı kalınlıkta enerji arttıkça Bragg pik konumundaki azalma miktarı düşmektedir. Şekil 7.'de kortikal kemik ve bütün biyomalzemelerin 0,6 cm kalınlıkta 160 ve 220 MeV enerjili protonlar için Bragg pikinde yaptığı azalma gösterilmiştir.

**Çizelge 3.** 5 farklı kalınlık için kortikal kemik ve biyomalzemelerde protonların Bragg pik konumları (Bragg peak positions of protons in cortical bone and biomaterials for 5 different thicknesses).

Enerji, MeV	K. Kemik	Teflon	%hata	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%hata	Ti6Al4V	%hata	Nital	%hata	P. Çelik	%hata	Vitalium	%hata	CoNiCrMo	%hata
0,4cm için															
160	17,1	17,1	0,0	16,3	4,7	16,4	4,1	16,0	6,4	15,5	9,4	16,6	2,9	15,3	10,5
180	21,1	21,0	0,5	20,3	3,8	20,5	2,8	19,8	6,2	19,4	8,1	19,4	8,1	19,4	8,1
200	25,2	25,3	0,4	24,6	2,4	24,8	1,6	23,9	5,2	23,6	6,3	23,6	6,3	23,6	6,3
220	29,8	29,8	0,0	29,0	2,7	29,1	2,3	28,5	4,4	28,2	5,4	29,2	2,0	27,9	6,4
0,6 cm için															
160	16,9	16,9	0,0	16,1	4,7	16,2	4,1	15,1	10,7	14,6	13,6	14,4	14,8	14,4	14,8
180	20,9	20,9	0,0	20,0	4,3	20,0	4,3	19,0	9,1	18,6	11,0	18,3	12,4	16,5	21,1
200	25,2	25,2	0,0	24,2	4,0	24,2	4,0	23,2	7,9	22,9	9,1	22,6	10,3	22,3	11,5
220	29,5	29,4	0,3	28,6	3,1	28,9	2,0	27,9	5,4	27,2	7,8	27,2	7,8	26,9	8,8
0,8 cm için															
160	16,7	16,7	0,0	15,5	7,2	15,7	6,0	14,4	13,8	13,7	18,0	13,6	18,6	13,4	19,8
180	20,8	20,5	1,4	19,6	5,8	19,5	6,3	16,7	19,7	16,5	20,7	16,5	20,7	16,5	20,7
200	24,9	24,8	0,4	23,9	4,0	23,9	4,0	22,4	10,0	21,7	12,9	21,8	12,4	21,5	13,7
220	29,6	29,2	1,4	28,2	4,7	28,2	4,7	27,2	8,1	26,2	11,5	26,2	11,5	26,2	11,5
1,0 cm için															
160	16,7	16,6	0,6	15,1	9,6	15,1	9,6	13,7	18,0	12,8	23,4	12,6	24,6	12,4	25,7
180	20,6	20,4	1,0	19,0	7,8	19,2	6,8	16,7	18,9	16,6	19,4	16,6	19,4	19,4	5,8
200	24,8	24,8	0,0	23,1	6,9	23,5	5,2	23,9	3,6	20,9	15,7	20,6	16,9	20,8	16,1
220	29,6	29,2	1,4	27,9	5,7	27,9	5,7	26,2	11,5	23,0	22,3	25,2	14,9	25,2	14,9
1,2 cm için															
160	16,7	16,2	3,0	14,7	12,0	14,7	12,0	12,9	22,8	12,0	28,1	11,8	29,3	11,6	30,5
180	20,5	20,3	1,0	17,3	15,6	18,8	8,3	16,7	18,5	15,8	22,9	15,6	23,9	15,5	24,4
200	24,8	24,4	1,6	22,9	7,7	23,5	5,2	21,0	15,3	20,0	19,4	17,3	30,2	17,3	30,2
220	29,2	29,2	0,0	27,2	6,8	27,9	4,5	23,4	19,9	23,2	20,5	22,9	21,6	22,9	21,6

### 3.2. İkinci Pik ve Genlikleri (Secondary Peak and Amplitudes)

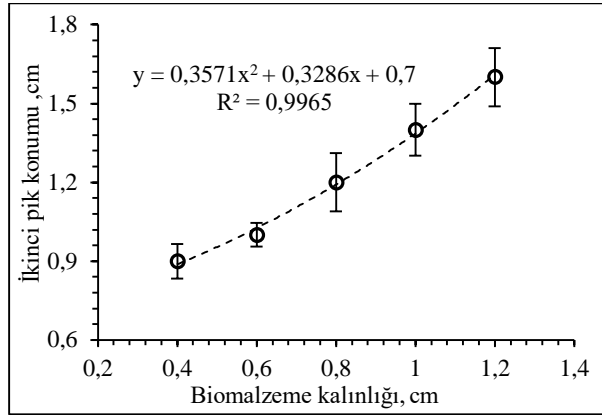
Çizelge 4.'de verilen hesaplama sonuçlarına göre, Proton demeti farklı yoğunluğa sahip katmanlı yapı boyunca ilerlerken az yoğun dan çok yoğun ortama geçtiğinde ikinci pik oluşmaktadır. Kortikal kemik referans alınarak biyomateriyallerden elde edilen ikinci pik sonuçları değerlendirilmiştir. Biyomalzemelerin sebep olduğu ikinci piklerin genliği kortikal kemiğe göre ciddi artışlar göstermektedir (Çizelge 4). Bu artış en az Teflonda % 0-15 arası, en çok Co-Ni-Cr-Mo'da % 176-323 arasında görülmektedir. Protonların enerjisi göz önüne

alındığında ise genelde enerji arttıkça ikinci pik genlikleri her biyomalzemede azalmaktadır. Aynı proton enerji değerinde ise kalınlık arttıkça (0,4→1,2 cm) ikinci pik genlikleri de artmaktadır. Aynı kalınlıkta proton enerjisi arttıkça biyomalzemelerin ikinci pik genliklerinin kendi içinde düzenli olarak azalmaktadır. Teflon'un kortikal kemik ile düzenli bir fark sergilediği ve kortikal kemiğe her kalınlık değerinde en yakın olan biyomalzeme olduğu görülmüştür. Baş plaka kesit fantomu sırasıyla deri (0,5 cm kalınlıklı), kortikal kemik veya biyomalzeme (kalınlıkları 0,4-1.2 cm aralığında değişmektedir), yumuşak doku ve su'dan oluşmaktadır.

**Çizelge 4.** Farklı biyomalzeme kalınlıkları için ikinci pik genlikleri (eV/A) (Second peak amplitudes for different biomaterial thicknesses).

Enerji, MeV	K.Kemik	Teflon	%hata	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%hata	Ti <sub>6</sub> Al <sub>4</sub> V	%hata	Nital	%hata	P.Çelik	%hata	Vitalium	%hata	Co-Ni-Cr-Mo	%hata
0,4 cm için															
160	0.0893	0.0952	7	0.1703	91	0.1655	85	0.2585	189	0.3062	243	0.2119	137	0.3241	263
180	0.0797	0.0875	14	0.1316	72	0.1521	98	0.2282	198	0.2695	251	0.2074	160	0.2832	269
200	0.0783	0.0736	6	0.1243	59	0.1298	66	0.1759	125	0.2060	163	0.2017	158	0.2160	176
220	0.0653	0.0690	6	0.1233	89	0.1220	87	0.1652	153	0.1931	196	0.1049	61	0.2038	212
0,6 cm için															
160	0.0914	0.0976	7	0.1785	95	0.1663	82	0.2645	189	0.3144	244	0.3241	255	0.3312	262
180	0.0841	0.0899	7	0.1765	110	0.1581	88	0.2383	183	0.2824	236	0.2908	246	0.3042	262
200	0.0730	0.0835	14	0.1493	105	0.1471	102	0.2219	204	0.2624	259	0.2700	270	0.2754	277
220	0.0715	0.0732	2	0.1400	96	0.1381	93	0.2079	183	0.2458	234	0.2529	244	0.2602	254
0,8 cm için															
160	0.0863	0.0987	14	0.1799	108	0.1766	105	0.2712	214	0.3244	276	0.3347	288	0.3452	300
180	0.0803	0.0906	13	0.1631	103	0.1581	97	0.2463	207	0.2937	266	0.3026	277	0.3093	285
200	0.0745	0.0835	12	0.1379	85	0.1470	97	0.2256	203	0.2681	260	0.2703	263	0.2843	282
220	0.0686	0.0743	8	0.1291	88	0.1381	101	0.2083	204	0.2460	259	0.2532	269	0.2585	277
1,0 cm için															
160	0.0935	0.1001	7	0.1830	96	0.1796	92	0.2790	198	0.3362	260	0.3472	271	0.3556	280
180	0.0796	0.0914	15	0.1658	108	0.1630	105	0.2516	216	0.3014	279	0.3110	291	0.2853	258
200	0.0791	0.0843	7	0.1521	92	0.1496	89	0.2159	173	0.2749	248	0.2835	258	0.2660	236
220	0.0691	0.0792	15	0.1423	106	0.1401	103	0.2129	208	0.2553	269	0.2604	277	0.2345	239
1,2 cm için															
160	0.0877	0.1009	15	0.1867	113	0.1833	109	0.2881	229	0.3501	299	0.3623	313	0.3713	323
180	0.0851	0.0909	7	0.1687	98	0.1622	91	0.2577	203	0.3105	265	0.3207	277	0.3284	286
200	0.0778	0.0836	7	0.1517	95	0.1496	92	0.2298	195	0.2750	253	0.2913	274	0.2979	283
220	0.0680	0.0776	14	0.1385	104	0.1401	106	0.2151	216	0.2539	273	0.2620	285	0.2701	297

Biyomalzeme kalınlığına göre ikinci piklerin konumunu veren Şekil 8 deki düşey eksen incelendiğinde, pik konumunun kortikal kemik veya biyomalzeme kesitinin son 1-2mm'sinde olduğu daha iyi anlaşılmaktadır. Yani Bragg pikinden sonra en fazla LET'e maruz kalan bölgenin kortikal kemik veya biyomalzemenin kesit sonu (yaklaşık son 1-2 mm'de) olduğunu görülmüştür. Bu bölgeden sonra LET seviyesinin Bragg platosu seviyesine indiği görülmüştür.



Şekil 8. Biyomalzemelerin kalınlığına göre ikinci pik konumları (Second peak positions according to the thickness of biomaterials)

İkinci pik konumlarının aynı kalınlık dikkate alındığında farklı proton enerjileri ve biyomalzemelere göre neredeyse sabit kaldığı (0,065-0,111 cm standart sapma ile) görülmüştür. Fakat Şekil 8.'de görüldüğü gibi malzemenin kalınlığı arttıkça ikinci pik konumları üstel olarak artmaktadır.

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Baş plaka kesit fantomu göz önüne alınarak Monte Carlo benzetimi ile 160-220 MeV enerjili protonların Bragg eğrileri hesaplanmıştır. Ayrıca kraniyoplasti uygulamalarında kullanıma potansiyeline sahip biyomalzemelerin Bragg eğrisi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Su ve dokulardan daha yoğun olan kortikal kemik ve biyomalzemeler sebebiyle ikinci bir pik oluştuğu görülmüştür. Bu ikinci pikin Bragg pikinden sonra en yüksek ikincil LET bölgesi olduğu ve pikin biyomalzemenin kalınlığı ile arttığı görülmüştür. Ayrıca proton enerjisi arttıkça ikinci pikin genliği azalmaktadır. Kortikal kemik ve biyomalzemelerin kalınlığı Bragg piki konumunu azaltmaktadır. Kortikal kemik yerine kullanılan biyomalzemelerden kemiğe en yakın sonuçlar teflon, titanyum alaşımları (Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V ve Nital) ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramik alaşımdan elde edilmektedir. Bu sonuçlara göre biyomalzemeli hastalar göz önüne alındığında radyot tedavide kritik öneme sahip doğru doz hesabında biyomalzemenin çeşidi ve kalınlığı da özellikle dikkate alınmalıdır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Wilson, R.R., "Radiological use of fast protons", *Radiology*, 47:487-91, (1946).
- [2] Lawrence, J.H., Tobias, C.A., Born, J.I., Mccombs, R.K., Roberts, J.E. and Anger, H.O., "Pituitary irradiation with highenergy proton beams: a preliminary report", *Cancer Res*, 18(2):121-34, (1958).
- [3] Gragoudas, E., Li, W., Goitein, M., Lane, A.M., Munzenrider, J.E. and Egan K.M., "Evidence-based estimates of outcome in patients irradiated for intraocular melanoma", *Arch Ophthalmol*, 120(12):1665-71, (2002).
- [4] Gottschalk, B., "Physics of proton interactions in matter", In: Pagannetti H, editor, *Proton Therapy Physics*, USA: Taylor & Francis Inc.; Chapter 2, p.20-57, (2012).
- [5] Carlsson, A.K., Andrea, P. and Brahme, A. "Monte Carlo and analytical calculation of computerized treatment plan optimization", *Phys. Med. Biol.* 42, 1033-1053, (1997).
- [6] Hall, E.J., Kellerer, A.M., Rossi, H.H. and Lam, Y-M.P. "the relative biological effectiveness of 160 MeV protons-II", *Int. Radiation Oncology Biol. Phys.*, 4: 1009-1013, (1978).
- [7] Li, J.S., Shahine, B., Fourkal, E. and Ma, C-M., "A particle track-repeating algorithm for proton beam dose calculation", *Phys. Med. Biol.*, 50: 1001-1010, (2005).
- [8] Seravalli, E., Robert, C., Bayer, J., Stichelbaut, F., Kurz, C., Smeets, J., Van, N.T. C., Schaart, D.R., Buvat, K., Parodi, K. and Verhaegen, F., "Monte Carlo calculations of positron emitter yields in proton radiotherapy", *Phys. Med. Biol.*, 57: 1659-1673, (2012).
- [9] Edwards, B.N. and Gold, B.R., "Analysis of surface cleanliness of three commercial dental implants", *Biomaterials*, 13: 775-780, (1992).
- [10] Sanan, A. and Haines, S.J., "Repairing holes in the head: A history of cranioplasty", *Neurosurgery*, 40:588-603, (1997).
- [11] Aydın, S., Kucukyuruk, B., Abuzayed, B. and Sanus, G.Z., "Cranioplasty: Review of materials and techniques", *Journal of Neurosciences in Rural Practice*, 2, (2011).
- [12] Gladstone, H.B., McDermott, M.W. and Cooke, D.D., "Implants for cranioplasty", *Otolaryngol Clin North Am*, 28:381-400, (1995).
- [13] Jandt, D.K., "Evolutions, Revolutions and Trends in Biomaterials Science – A Perspective", *Advanced Engineering Materials*, 9, (2007).
- [14] Jones, D. W., "Adv. Ceram. Mater", *Key Eng. Mater.*, 122: 345, (1996).
- [15] Kohn, D.H. and Ducheyne, P., In "*Materials Science and Technology—A Comprehensive Treatment*", edited by R. W. Cahn, P. Haasen and E. J. Kramer, "Medical and Dental Materials", edited by D. F. Williams (VCH Publishers Inc., New York) vol. 14, p. 41, (1992).
- [16] Webster, T.J. and Ejiogor, J.U., "Increased osteoblast adhesion on nanophase metals: Ti, Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V, and CoCrMo", *Biomater*, 25: 4731, (2004).
- [17] Molinari, A., Straffelini, G., Tesi, B. and Bacci, T., "Dry sliding wear mechanisms of the Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V alloy", *Wear*, 208:105-12, (1997).
- [18] Long, M. and Rack, H.J., "Titanium alloys in total joint replacement – a materials science perspective", *Biomaterials*, 19:1621-39, (1998).
- [19] Ganesh, B.K.C., Ramanaih, N. and Chandrasekhar, R.P.V., "Dry sliding wear behavior of Ti-6Al-4V implant alloy subjected to various surface treatments", *Trans. Indian Inst. Metals.*, 65:425-34, (2012).

- [20] Sanus, G.Z., Tanrıverdi, T., Ulu, M.O., Kafadar, A.M., Tanrıver, N. and Ozlen, F., "Use of Cortoss as an alternative material in calvarial defects: The first clinical results in cranioplasty", *J Craniofac Surg*, 19:88-95, (2008).
- [21] Griffith, L. G., "Polymeric biomaterials", *Acta. Mater.* 48: 263, (2000).
- [22] Wang, T., "Effect of substrate oxidation on improving the quality of hydroxyapatite coating on CoNiCrMo", *Journal of Materials Science*, 39: 4309–4312, (2004).
- [23] Sundgren, J.E., Bodö, P. and Lundström, I., "Auger Electron Spectroscopic Studies of the Interface between Human Tissue and Implants of Titanium and Stainless Steel", *Journal of Colloid and Interface Science*, 110: 1, (1986).
- [24] Dingfelder, M., Inokuit, M. and Paretzke, H.G., "Inelastic-collision cross sections of liquid water for interactions of energetic protons", *Radiat. Phys. Chem.* 59: 255-275, (2000).
- [25] Internet: SRIM, <http://www.srim.org/> (18.05.2018)
- [26] Archambeau, J.O., Bennett, G.W., Levine G.S., Cowen R, and Akanuma A., "Proton Radiation Therapy", *Radiology*, 110:445-457, (1974).
- [27] Fippel, M. and Soukup, M. A., "Monte Carlo dose calculation algorithm for proton therapy", *Med. Phys.* 31:8, (2004).
- [28] Medin, J. and Andreo, P., "Monte Carlo calculated stopping-power ratios, water/air, for clinical proton dosimetry (50-250 MeV)", *Phys. Med. Biol.*, 42: 89-105, (1996).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Manyetik alana maruz toz metalurjisiyle (T/M) üretilmiş bronz yatakların sürtünme özelliklerinin incelenmesi

*Investigation of frictional properties of manufactured by powder metallurgy (P/M) the bronze bearings exposed to magnetic field*

Yazar(lar) (Author(s)): Zekeriya DABAN<sup>1</sup>, Ertuğrul DURAK<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-6734-2118

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-6957-3796

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Daban Z. ve Durak E., “Manyetik alana maruz toz metalurjisiyle (T/M) üretilmiş bronz yatakların sürtünme özelliklerinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 137-149, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.526746



# Manyetik Alana Maruz Toz Metalurjisiyle (T/M) Üretilmiş Bronz Yatakların Sürtünme Özelliklerinin İncelenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Zekeriya DABAN<sup>1</sup>, Ertuğrul DURAK<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup>Torosgaz Doğalgaz Dağıtım A.Ş. Isparta, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye

(Geliş/Received : 13.02.2019 ; Kabul/Accepted : 15.03.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada elektrik motorlarındaki rotor milini destekleyen yataklarda oluşan sürtünme durumuna manyetik alanın etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmada kendinden yağlamalı Toz Metalurji (T/M) esaslı kaymalı yataklarla 15 N, 40 N, 65 N sabit yüklerde ve 100, 200, 400, 800, 1200 d/d hızlarda testler yapılmıştır. Manyetik alan şiddeti olarak 2.5, 5 ve 7.5 mT seçilmiştir. Deneyler üçer defa tekrarlanarak elde edilen sürtünme katsayısı sonuçlarının ortalamaları ( $\mu_{ort}$ ) hesaplanarak grafiklerde sunulmuştur. Manyetik alansız testlerde yük ve hızın artması ile genel olarak  $\mu_{ort}$  arttığı gözlemlenmiştir. Manyetik alan uygulanmış 2.5 mT testlerinde yük ve hızın artmasıyla  $\mu_{ort}$  değerlerinde artış göstermiştir. 5 mT uygulanmış testlerde,  $\mu_{ort}$  yük ve hız değişimine göre çok fazla değişim göstermemiştir. 7.5 mT uygulanmış testlerde,  $\mu_{ort}$  yük ve hız artışına göre bir azalma göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Manyetik alan, kaymalı yatak, toz metalurji, elektrik motoru, sürtünme katsayısı.

## Investigation of Frictional Properties of Manufactured by Powder Metallurgy (P/M) the Bronze Bearings Exposed to Magnetic Field

### ABSTRACT

In this study, it is aimed to give an experimental investigation of the effect of the magnetic field in the electric motors to the friction state in the rotor shaft supporting journal bearing. In the experimental study, it was performed with self-lubricated Powder Metallurgy (P/M) based journal bearings such as at 15 N, 40 N, 65 N constant loads and 100, 200, 400, 800, 1200 rpm speeds, respectively. Three different values of 2.5, 5, and 7.5 mT were selected as the magnitude of the magnetic field. The experiments were repeated three times and then the arithmetic mean values ( $\mu_{ave}$ ) presented in the graphics was calculated from friction coefficients test results. It has been observed  $\mu_{ave}$  increases in general with the increase of the load and rotation speed in the without magnetic field tests. In magnetic field applied 2.5 mT tests,  $\mu_{ave}$  values increased with increasing load and speed. For the 5 mT, it was seen that  $\mu_{ave}$  did not change much compared to the change of load and speed. In tests conducted with 7.5 mT,  $\mu_{ave}$  showed a decrease by increasing load and speed.

**Keywords:** Magnetic field, journal bearing, powder metallurgy, electric motor, friction coefficient.

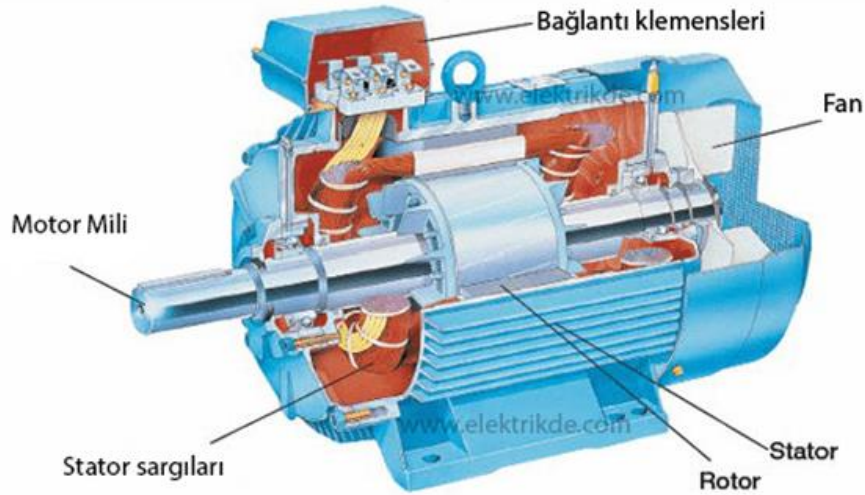
### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektromanyetik alanın iki bileşeni vardır; elektrik ve manyetik alandır. Manyetik alan; hareketli ve elektrik yüklü zerrelerin güç etkisinde kaldığı boşluk olup, atomların içindeki elektronların çekirdek etrafında ve kendi ekseninde dönmeleri sonucu oluşmaktadır. Manyetik alan doğrudan gözle görülemeyen veya kolayca hissedilemeyen, fakat sonuçları görülebilen veya hissedilebilen bir olgudur. Tüm maddelerin zayıf ya da güçlü manyetik alanları vardır[1,2].

Bir sistemin manyetik alanı, iyi bir manyetik yalıtım yapılmazsa başka sistemlerin çalışmasını olumsuz etkileyebilmektedir. Örneğin, televizyon ya da bilgisayarın yanında cep telefonu faaliyete geçince hem parazit sesleri duyulur hem de ekran görüntülerinde bozulmalar olur.

Elektrik motorları doğru akım motorları, alternatif akım elektrik motorları, senkron elektrik motorlar veya asenkron elektrik motorlar gibi çeşitleri vardır. Elektrik motorlarında genellikle yuvarlanma elemanlı yataklar (rulmanlar) daha yaygın kullanılmaktadır. Bununla beraber küçük güçlerdeki elektrik motorlarında burç olarak adlandırılan silindirik radyal kaymalı yataklarda kullanılmaktadır(Şekil 1.)[3].

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : ertugruldurak@sdu.edu.tr



Şekil 1. Örnek bir elektrik motoru yapısı (simple electric motor detail view)[4]

Toz metalürjisi (T/M), metal tozları üretimi ve bu tozlardan yarı bitmiş ya da bitmiş nesnelere yapma bilimi ve sanatı olarak tanımlanır. Toz metal parçalarının üretimi elementel veya alaşımlı tozların karıştırılması, bu tozların uygun kalıplarda sıkıştırılması ve toz partikülleri arasında metalürjik bir bağ oluşturulması amacıyla atmosfer kontrollü fırınlarda sinterlenmesi aşamalarını içermektedir. Elde edilen nihai ürün çeşitli alanlarda kullanılmak için yeterli yoğunluğa ve dayanıma sahip bir malzemedir[5]. Genel olarak T/M uygulamaları olarak;

- Yapısal otomotiv parçaları (biyel kolu, kendinden yağlamalı kaymalı yataklar (burçlar), motor ve transmisyon parçaları, vb.),
- Elektrik ve elektronik uygulamaları,
- Manyetik algılayıcılar,
- Tahrik elemanları,
- Isıl düzenleyici cihazlar,
- Biyomedikal parçalar,
- Sürtünme malzemeleri,
- Yüksek sıcaklık yapıları,
- Korozyona dirençli cihazlar (ortodontik destek parçaları),
- Kesme ve aşınma parçaları,
- Atalet ve yüksek yoğunluklu cihazlar şeklinde göstermek mümkündür[6].

Bu yataklar kendi kendini yağlayan yataklar olarak da isimlendirilmektedir. Özellikle 1950'lerden sonra bu yatakların kullanımı giderek artmıştır. En çok kullanılan T/M kaymalı yataklar demir ve bronz içeriklidir. Bu yataklar daha çok, hızın küçük olduğu ve aşırı bir yağlama gerektirmeyen yerlerde tercih edilmektedir. % 15 – 35 gözenekliliğe sahip bu yataklara kolaylıkla yağ emdirilebilmektedir. Bu yatakların en büyük avantajları, yatak için gerekli olan yağlama için bünyelerinde bulunan bu gözeneklerin yağ deposu görevini üstlen-

meleridir. Yatak içinde mil dönmeye başladığı zaman, sürtünmeden dolayı sıcaklık artar ve metale göre yağın genleşme katsayısı büyük olduğundan, ayrıca yatak ile mil arasındaki yağ filminin hidrodinamik basınç değişikliği nedeniyle depo görevi yapan gözeneklerdeki yağ, gözeneklerden mile doğru emilir ve yağlama görevini yapar. Dönme işlemi durduğunda yatak soğur ve kılcılık etkisi ile yağ tekrar gözeneklere emilir. Yağ kalitesi en iyi çalışma ömrü ve yüklem kapasitesi için önemlidir. Bu yüzden gözenekli yataklarda kullanılan yağın yaşlanmaya karşı dayanıklı olması gerekmektedir[7-10]. Ekonomik, çevre ve hatta teknik sebeplerden dolayı kendi kendini yağlayan malzemelere eğilim artmaktadır. Bu yolla yağ ve gres gibi yağlayıcıların kullanımı azalmakta ve bu sayede makine konstrüksiyonları sadeleşmektedir[9,11].

Elektrik motorlarında kullanılan T/M esaslı yataklardaki sürtünmeye manyetik alanın etkisi ile ilgili literatürde çalışmalar yok denecek kadar sınırlı sayıdadır. Çalışmaların manyetik alanın ve / veya elektrik akımının yatak hasarları üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Bu nedenle elektrik motorlarında kullanılan yataklara manyetik alan etkisi ile ilgili ulaşılabilen kısıtlı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. Elektrik motorlarında motor milini hareket ettirebilmek için mıknatıslarla veya sargılara elektrik akımı verilerek dönme hareketi elde edilmektedir. N kutbundan S kutbuna doğru oluşan döner manyetik alandan faydalanarak dönme hareketi sağlanmaktadır. Ancak sağlanan bu dönme hareketine ters bir yönde manyetik alanın etki etmesi sonucunda, motora karşı bir moment meydana gelebilme olasılığı mümkündür. Bunun sonucunda da motor gücünde bir kayıp gözlemlenebilmektedir. Karşıt momentin motor içinde değil de dışında gözlemlenmesi durumunda ise yataklarda karşıt kuvvet ile titreşim ve buna bağlı olarak da zamanla aşınmalar meydana gelebilmektedir[12].

Mil etrafındaki dengesiz manyetik alan, söz konusu milin mıknatıslanmasına neden olabilmektedir. Bu mil akıları, imalat sürecindeki toleranslardan dolayı maki-nelerin elektriksel ve manyetik devrelerindeki asimet-riler nedeniyle bu durum tüm elektrikli makinelerde bulunmaktadır. Elektrikli makinedeki milin etrafına bir bobin sarılırsa, bu akılar Faraday Yasası gereğince voltaj oluşturmaktadır. Manyetik akılar, milden yatağa, makine gövdesinden mili destekleyen diğer yatağa geç-mektedir. Dolayısıyla, bu akılar, mil dönerken yatak yüzeyini keserek, milin muylu uzunluğu boyunca bir potansiyel oluşturabilmektedir. Böylece bölgesel bir yatak akımı oluşmaktadır. Bu akım, bir uçtaki shaftın muylusundaki yatak yüzeyinde oluşturulan yağ filmi boyunca iletilir ve mile geri döner ve aynı muyludaki diğer uca tekrar geri geçiş yapar. Yatağın yuva ile yalı-tımı pratikte çok az uygulanmaktadır. Bu durum akı yolunun manyetik isteksizliğinin artmasına rağmen, yatak içindeki bölgesel akımı durdurmamaktadır[13].

Sohre ve Nippes 0,3 mT akım yoğunluğuna sahip bir milin, bölgesel yatak akımının zarar vermeden tatmin edici biçimde çalışacağını belirtmektedir. Bu nedenle yüksek hızlı turbo makinelerde bu düzeyde akı yoğunluğu önerilmektedir. Mil çevresel hızı makinenin kapasitesi büyüklüğüne bağlı olarak arttıkça bölgesel yatak akımına neden olan indüklenmiş voltajın artacağı belirtilmektedir[14]. Sohre ve Nippes tarafından önerilen akı yoğunluğunun kabul edilebilir seviyesine yakın bir seviye de Costello tarafından yapılan bir diğer çalış-mada 0,2 mT olarak belirtilmektedir[13].

Doğru akım motorlarında kendi kendine yağlanan metal yataklar ya da küresel yuvarlanma elemanlı yataklar kullanılmaktadır. Yataklarda meydana gelen aşınmalar ve sürtünmeler, akımın yön değiştirmesi olayı olarak bilinen komütasyonun bozulmasına ve arızalara yol açabilmektedir[15].

Kadıoğlu [16] yapmış olduğu yüksek lisans tez çalış-masında; sabit küresel yuvarlanma elemanlı yataklarda farklı yük ve hızlarda manyetik alansız ve üç farklı manyetik alan şiddetine maruz bırakarak testler yapmıştır. Manyetik alanın sürtünme katsayısına etkisinin olduğu, bu etkinin bazı deney şartlarında sürtünme katsayısını düşürücü, bazı deney şartlarında ise artırıcı yönde olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca söz konusu bu çalışmadaki küresel yuvarlanma elemanlı yataklı elektrik motorlarındaki manyetik alan ile ilgili çalışmalar özetlemek gerekirse; elektrik motorları ve jeneratörler yuvarlanma elemanlı yataklar üzerinden akım geçişinin elektrostatik, manyetik akı asimetrisi ve yüksek frekanslı elektrik akımları olduğu, imalat zorluklarından dolayı mükemmel simetriğe sahip bir elektromanyetik bir akım oluşturmanın imkânsız olduğu, asimetrik manyetik akı yatak boyunca bir elektrik akımı oluşturabileceği, izolasyonla bu olumsuz etki en düşük seviyeye indirilebileceği[17], Prashad[18] elektrik motorlarında kullanılan yuvarlanma elemanlı yatak yüzeylerindeki hasarın, manyetik akı yoğunluğu ölçümü, yatak ve mil arasındaki voltaj büyüklüğünün ölçümü ile belirlenebileceği, Djeddi vd. [19], elektrik

motorlarındaki hasarların erken teşhisi için elektriksel sinyal proses araçlarını kullanılabileceği, Singh vd. [20], elektrik motorlarındaki yuvarlanma elemanlı yatak hasarlarına manyetik alandaki endüktans değişiminden kaynaklanan düzensiz yüklerin sebep olduğu, Prashad[21] tarafından elektrik akımının etkisi altında iç bilezik, dış bilezik ve yuvarlanma elemanlarındaki yü-zey aşınma izlerine, manyetik akı yoğunluğunun etki-sinin iç bilezikte daha fazla olduğu, Uysal[22] tarafın-dan tek sıra sabit küresel yuvarlanma elemanlı yatak-larda sürtünme kaybında yuvarlanma elemanı ile bile-zikler arasındaki çalışma boşluğunun çok fazla etki etti-ği de belirtilmektedir[16].

Tunay ve Durak tarafından yapılan çalışmada, sabit manyetik alana maruz kalan T/M bronz esaslı yatak numunelerinde manyetik alan etkisi ile sürtünme katsa-yılarında artış olduğu belirtilmektedir. Ayrıca aşınma miktarı her ne kadar genelde sürtünme katsayısının art-masıyla aşınma miktarının arttığı görülse de, manyetik alanın hem aşınma miktarı hem de deney süresince sıcaklık değişimi üzerine etkilerinin de ifade edile-bilmesi için daha fazla sayıda deney yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır[9].

Radu, elektrik motorlarındaki oluşan kaçak manyetik alanların hem alternatif akım hem de doğru akım motor-larındaki yataklarda hasarlar oluşturabilecek büyüklükte bir elektrik akımı üretebileceğini belirtmektedir. Bu sorunları ortadan kaldırmak için ise elektrik motorunda topraklama fırçaları kullanılması gerektiği vurgu-lanmıştır[23].

Makine sistemlerinin dinamik davranışları büyük önem taşıdığı, makinelerin dinamik davranışlarının belir-lenmesinde titreşim karakteristiklerinin çok önemli olduğu bilinmektedir[24]. Yeterli sıkma momenti ile sıkılmamış ve bunun neticesinde çalışma sırasında gevşemiş vida bağlantıları, uygun olmayan gövde, bağlantı yeri hataları, uygun olmayan montaj, hareketli yüzeyler arasında gereğinden fazla boşluk bırakılması gibi nedenler elektrik motorlarında mekanik gevşemelere neden olmakta, bunlarda titreşim ve aşınmanın artma-sına yol açabilmektedir[25]. Sistemdeki titreşimlerin nispeten azaltılması makine parçalarında uygun malzeme kullanılması, uygun ısı işlem uygulanması, uygun yatak boşluğu, sönümlü yatak kullanmak ile mümkün olduğu yapılan mil yatak çalışmalarında belirtilmek-tedir[24, 26-28].

Aleutdinova vd., metal malzemelerin yağsız durumda kayma hareketi sırasındaki yüzeylerde temas bölgesinde 100 A/cm<sup>2</sup>den daha yüksek bir akım geçişi gerçek-leştiği belirtilmiştir. Bu parametrelerinin; malzemenin başlangıçtaki yapısına göre faz sayısı ve alaşım atomu-nun miktarının artırılmasından dolayı sürtünme yüzey-lerinin aşınmasına neden olduğu gösterilmiştir[29].

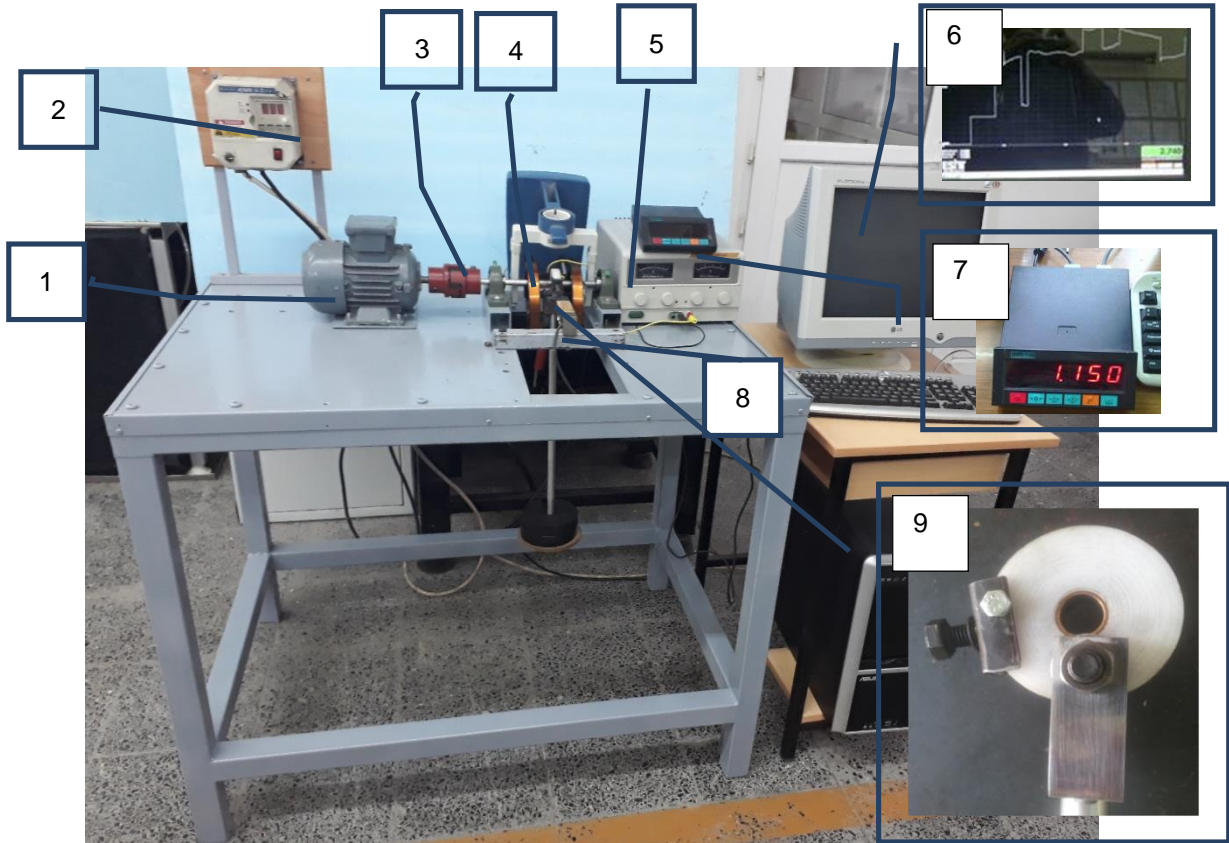
Bu çalışmada[12] elektrik motoru ile tahrik edilen mile montaj edilen kendinden yağlamalı T/M esaslı bronz radyal kaymalı yataкта oluşan sürtünme katsayısına manyetik alanın etkisi incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

### 2.1 Deney Seti (Test Rig)

Süleyman Demirel Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Triboloji Laboratuvarı'nda bulunan deney seti, manyetik alan uygulayabilmek için bu çalışma kapsamında tekrar modife edilmiştir (Şekil 2) [12]. Söz

konusu deney düzeneği için şiddeti ayarlanabilir manyetik alan üreteçlerinden yararlanılmıştır. Deney Düzeneği ile seçilecek test yataklarında oluşan sürtünme kuvveti, aşınma, yorulma ömrü, en uygun yağlama şartları veya yatak malzemelerinin tribolojik özellikleri ve performanslarının farklı yük, hız gibi farklı çalışma şartlarında deney düzeneğine (Şekil 2) ilave yapılarak testler yapılabilecek özelliklere sahiptir.



1-Elektrik motoru 2-Hız değıştirici 3-Kavrama 4-Bobinler 5-Besleme Ünitesi  
6-Örnek test sonucu 7-İndikatör 8-Yük Hücresi 9-Test yatağı 10-Yük

Şekil 2. Deney Seti ve detay görünümleri (test set and detail view)

Deney düzeneğinde elektrik motorunun mili kauçuk ara malzemeli elastik kavrama yardımıyla test yatağının bulunduğu mile bağlanmaktadır. Böylece elektrik motorunda oluşacak titreşimlerden test yatağının etkilenmesi en aza indirilmiştir. Sistemde tahrik elemanı olarak 1380 d/d, 220/380 V 1,5 - 0,87 A ve 50 Hz tek-nik özelliklere sahip alternatif akımlı elektrik motoru kullanılmıştır. Frekans değıştirici ile elektrik motorundan farklı devir sayıları elde etmek mümkün olmaktadır.

### 2.2. Test Yatağı ve Test Mili (Test specimen bearing and test shaft)

Deneylerde piyasadan hazır olarak temin edilen T/M esaslı kendinden yağlamalı bronz test yatağının iç çapı 13 mm, dış çapı 20 mm ve genişliği 10,5 mm'dir. Yatak numunelerinin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri yaklaşık  $Ra = 0,80-0,95 \mu\text{m}$ 'dir. Test yataklarının yerleştirildiği gövde, manyetik alanın etkisini daha iyi fark edebilmek için metalik olmayan teflon malzemeden

üretilmiştir. Böylece yatak gövdesi ile sürtünme ölçüm ünitesi (yük hücresi) arasında herhangi bir metalik bağ söz konusu değildir.

Deney düzeneğindeki test yatağını taşıyan mil malzemesi SAE 1050 çelik olup çapı 12,5 mm'dir. Mil test yatağının sağında ve solunda olmak üzere iki adet küresel oynak destek yatağı ile desteklenmiştir. Mil yüzeyleri taşlanmış olup ortalama yüzey pürüzlülüğü  $Ra=0.25 - 0.30 \mu\text{m}$ , yüzey sertliği ise yaklaşık 55 HRC'dir.

### 2.3 Deneysel Çalışma Parametreleri (Experimental testing parameters)

Bu çalışmada modife edilen deney düzeneği ile kendinden yağlamalı T/M esaslı bronz radyal kaymalı yatakların sürtünme katsayısı, aşınma gibi tribolojik özelliklerinin deneysel incelenmesi mümkündür. Çalışma kapsamında testler  $F_1=15 \text{ N}$ ,  $F_2=40 \text{ N}$ ,  $F_3=65 \text{ N}$  sabit yüklerde; 100, 200, 400, 800, 1200 d/d mil dönme

hızlarında yapılmıştır. Yatak numuneleri hem manyetik alana maruz bırakılmadan hem de çalışmanın özgünlüğünü oluşturan 2.5, 5 ve 7.5 mT (miliTesla) şiddetindeki manyetik alana maruz bırakılarak testler yapılmıştır[12]. Ülkemizde yerli elektrik motor üreticilerle yapılan görüşmelerde özellikle küçük güçteki elektrik motorları için mil kesitindeki tipik akı yoğunluğu olarak 0.1–0.2 T, yatakların etrafında ise 5–10 mT olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle çalışmada laboratuvar şartları da dikkate alınarak 2.5, 5 ve 7.5 mT manyetik alan büyüklükleri seçilmiştir.

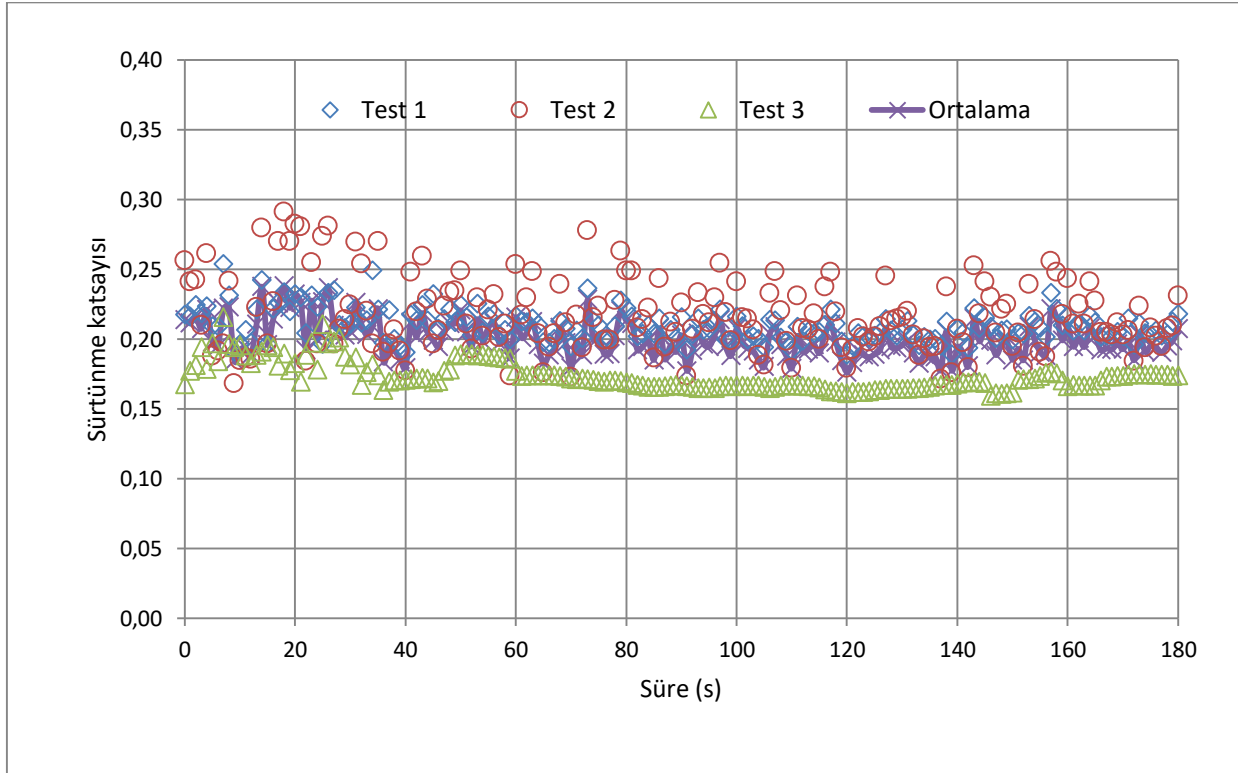
### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Sürtünme katsayısı ölçümü için yapılan deneylerin süresi 180 saniye olarak seçilmiştir. Deneylerde hata payının en aza indirgenmesi için deneyler üç defa tekrarlanarak elde edilen sürtünme katsayıları sonuçların ortalaması alınmıştır. Örnek olarak Şekil 3'te manyetik alana maruz kalmayan 100 d/d hız ve 40 N yük uygulanan testlerde elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları ve ortalama sürtünme katsayısı değişimi grafik halinde sunulmuştur. Ortalama sürtünme katsayıları değişiminin her bir deney şartı için ayrı ayrı tekrar aritmetik ortalaması alınmış ve tek bir ortalama sürtünme katsayısına ( $\mu_{ort}$ )

dönüştürülmüştür. Şekil 3'te gösterilen örnek testlerden elde edilen  $\mu_{ort}$  değeri 0.199 olarak hesaplanmıştır. Tüm deney sonuçları örnek test sonuçlarındaki aynı işlemler tekrarlanarak elde edilen  $\mu_{ort}$  ortalama sürtünme katsayıları grafik halinde Şekil 4-11'de verilmektedir.

Elektriksel olaylar çevredeki canlıları ve cansızları (örneğin; elektriksel cihazları) etkilemektedir. Elektriksel alanlar; elektrik alanı, manyetik alan ve elektromanyetik alan olarak gruplandırılmaktadır. Bu elektriksel alanlar; elektrik enerjisi üretildiğinde, enerji iletim hatlarından veya kablolarından veya havadan gönderildiğinde veya dağıtıldığında veya elektriksel alanlarda kullanıldığında oluşmaktadır. Elektrik enerjisinin kullanımı; modern yaşantımızın bir parçası olduğundan, bu alanlar çevremizde her yerde vardır. Bu elektriksel alanların frekans aralığı 0-300 GHz'dir[30].

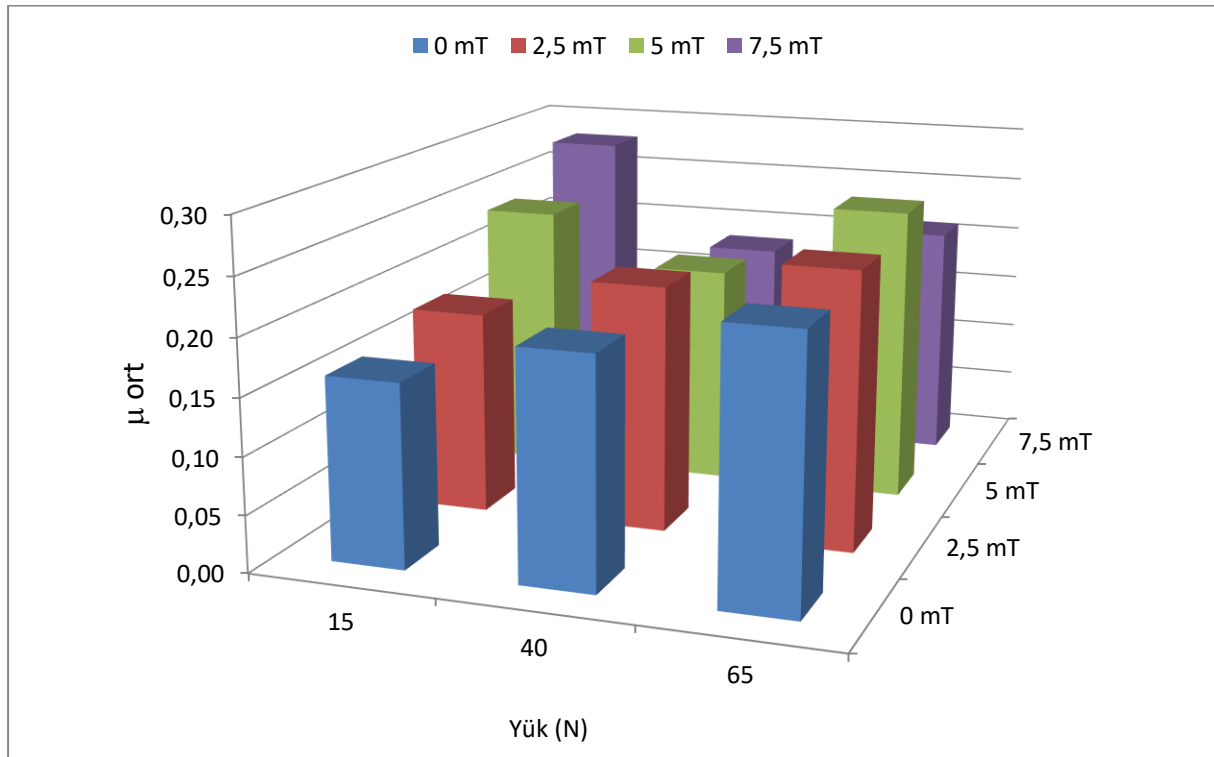
Şekil 4-11'deki sürtünme katsayıları ölçümlerindeki dalgalanmanın nedenleri olarak mekanik etkiler, yatak, mil aşınma partikülleri olabileceği gibi manyetik alandaki frekansındaki değişimi de gösterilebileceği düşünülmektedir. Manyetik alan şiddeti arttıkça deney süresince sürtünme katsayılarının değişiminde daha fazla dalgalanmalar olduğu grafiklerde görülmektedir (Şekil 4-8). Bu değişimlere yukarıda bahsedilen faktörlerin de sebep olabileceği düşünülmektedir.



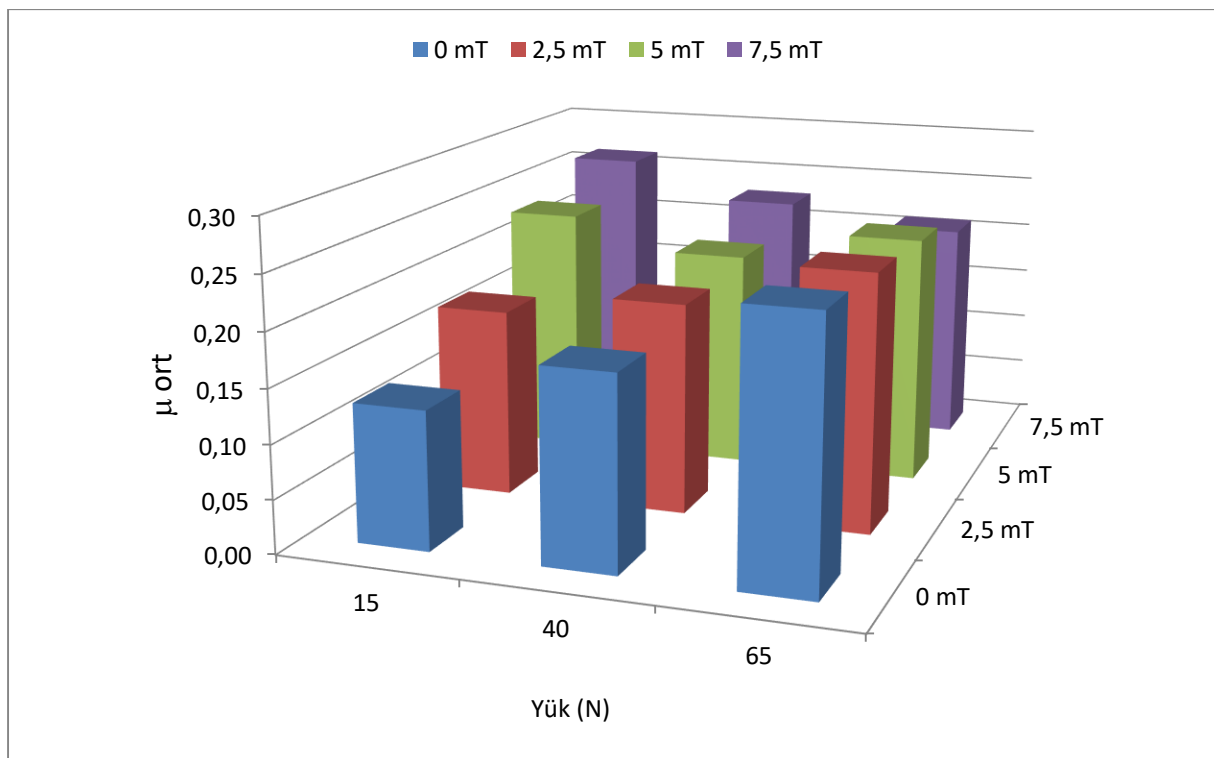
Şekil 3. Örnek testlerdeki sürtünme katsayısı değişimleri (variation of the friction coefficient sample test results and averaged friction coefficient)

$\mu_{ort}$ 'nın yüklerle değişimini görebilmek için 100 d/d için Şekil 4, 200 d/d için Şekil 5, 400 d/d için Şekil 6, 800 d/d

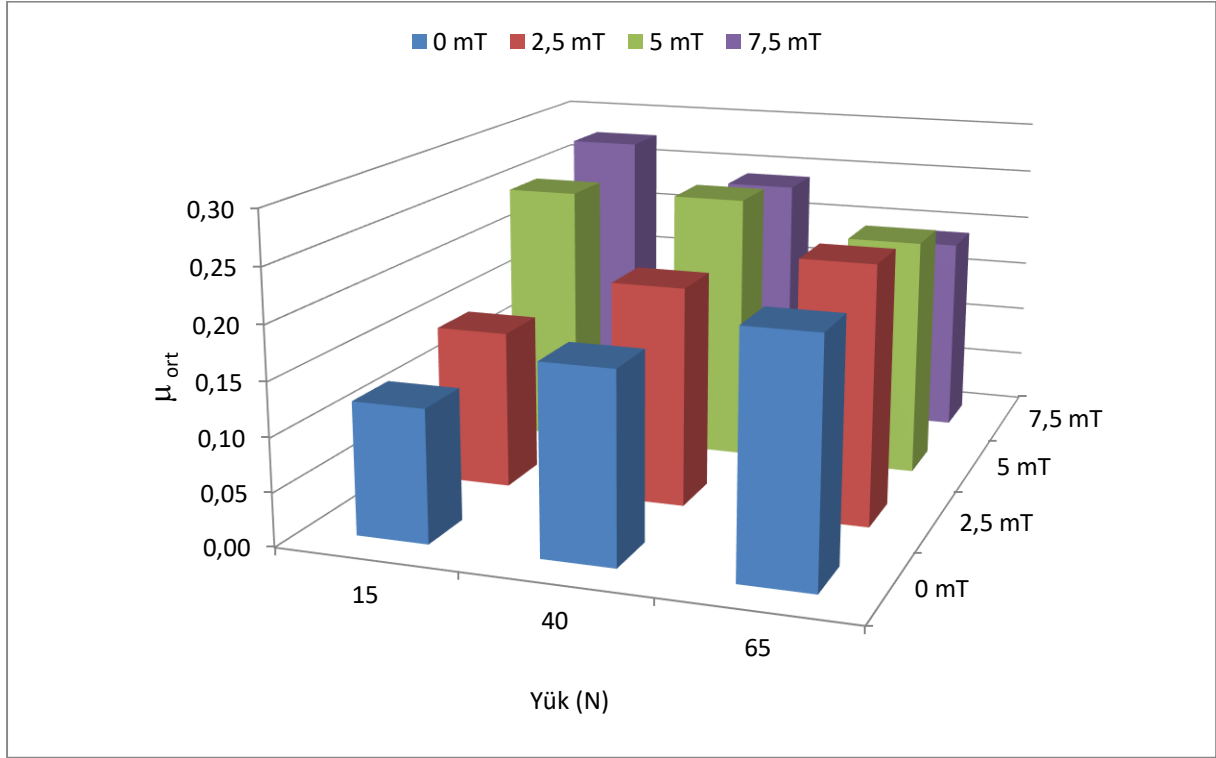
için Şekil 7 ve 1200 d/d hız için ise Şekil 8'de verilmiştir.



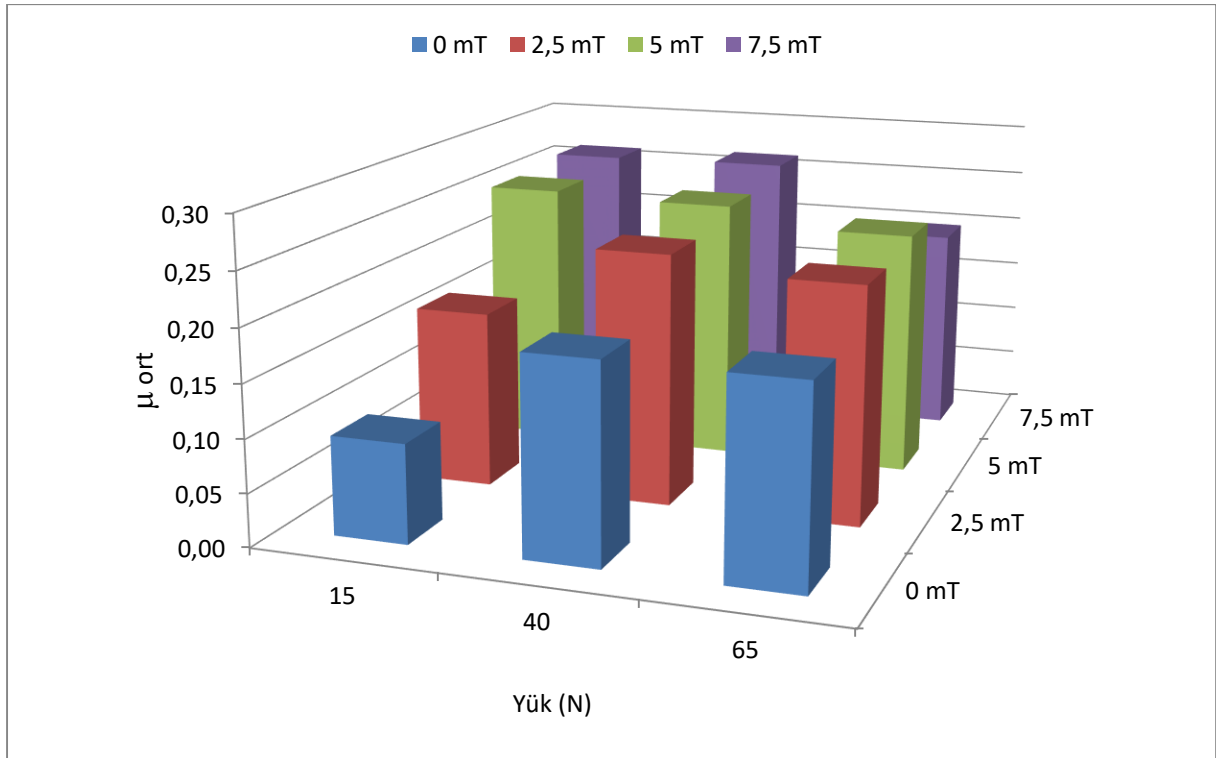
Şekil 4. 100 d/d hızdaki  $\mu_{ort}$  değerleri ( values of the  $\mu_{ave}$  at 100 rpm)



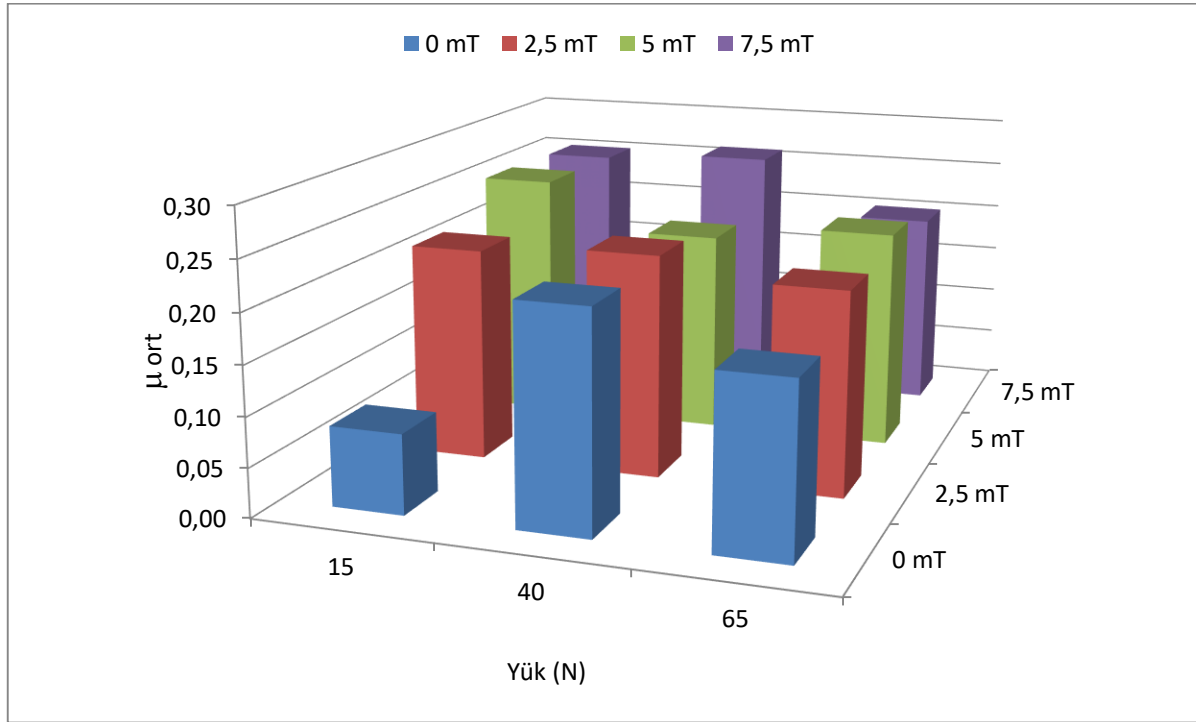
Şekil 5. 200 d/d hızdaki  $\mu_{ort}$  değerleri ( values of the  $\mu_{ave}$  at 200 rpm)



Şekil 6. 400 d/d hızdaki  $\mu_{ort}$  değerleri ( values of the  $\mu_{ave}$  at 400 rpm)



Şekil 7. 800 d/d hızdaki  $\mu_{ort}$  değerleri ( values of the  $\mu_{ave}$  at 800 rpm)



Şekil 8. 1200 d/d hızdaki  $\mu_{ort}$  değerleri ( values of the  $\mu_{ave}$  at 1200 rpm)

100 d/d hızda manyetik alan uygulanmayan ve 2.5 mT manyetik alan uygulanan testlerde yükün artması ile  $\mu_{ort}$  değerinde bir artış olurken, 5 mT uygulanan testlerde önce bir düşüş, sonra tekrar bir artış görülmektedir. 7.5 mT deneylerinde yükün artması ile  $\mu_{ort}$  değerinde önemli bir düşüş, sonra ise daha az miktarda bir artış sergilemiştir (Şekil 4).

200 d/d hızda manyetik alan uygulanmayan ve 2.5 mT manyetik alan uygulanan deneylerinde deney yükünün artması ile  $\mu_{ort}$  değerinde bir artış olduğu rahatlıkla görülmektedir. 5 mT deneylerinde ise önce düşüş, sonra ise daha az bir miktarda artış sergilemiştir. 7.5 mT deneylerinde ise yükün artması ile  $\mu_{ort}$  değerinde düşüş olduğu rahatlıkla görülmektedir (Şekil 5).

400 d/d hızda manyetik alan uygulanmayan ve 2.5 mT deneylerinde yük artması ile  $\mu_{ort}$  değerinde bir artış olduğu rahatlıkla görülmektedir. 5 ve 7,5 mT 400 d/d hızda ise yükün artması  $\mu_{ort}$  değerinde bir düşüş olduğu rahatlıkla görülmektedir. 7.5 mT ise yükün artması ile  $\mu_{ort}$  değerinde belirgin bir düşüş sergilemiştir (Şekil 6).

800 d/d hızda manyetik alan uygulanmayan ve 2.5 mT hızda deneylerde yük artması ile  $\mu_{ort}$  değerinde önce bir artış, sonra çok fazla değişmediği görülmektedir. 5 mT ise yükün artması ile çok fazla değişim sergilememiştir. 7.5 mT ise yükün artması ile önce az bir artış, sonra belirgin bir düşüş sergilemiştir (Şekil 7).

1200 d/d hızda manyetik alan uygulanmayan deneylerde yük artması  $\mu_{ort}$  değerinde önce çok büyük bir artış, sonra bir düşüş (ancak ilk yüke göre yine yüksek bir değer) olduğu rahatlıkla görülmektedir. 2.5 mT yükün artması ile çok fazla değişim sergilememiştir. 5 mT ise yükün artması ile  $\mu_{ort}$  değerinde önce belirgin bir düşüş, sonra

daha az bir artış sergilemiştir. 7.5 mT ise yükün artması ile  $\mu_{ort}$  değerinde önce fazla bir değişim göstermezken, sonra belirgin bir düşüş sergilemiştir (Şekil 8).

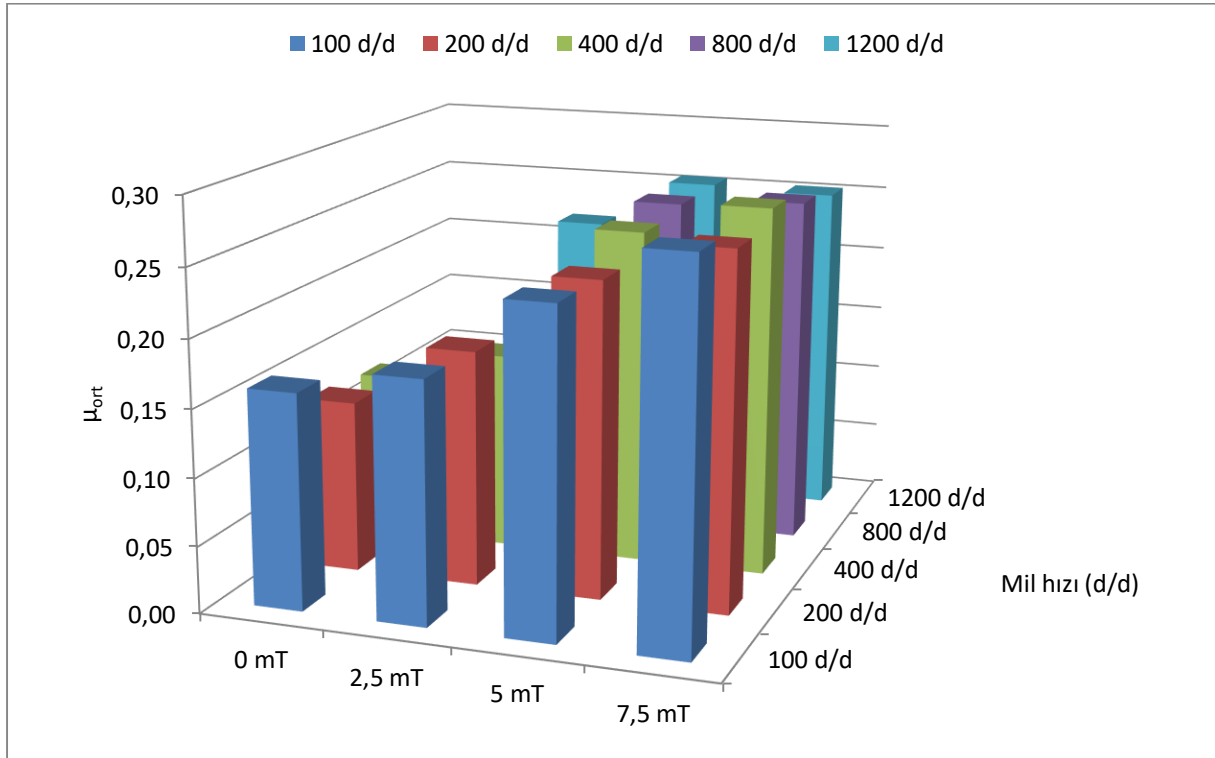
En düşük yük olan 15 N'de özellikle manyetik alan uygulanmayan deneylerde hızın artması ile  $\mu_{ort}$ 'da düşüş gerçekleştiği görülürken manyetik alan uygulanan deneylerde ise  $\mu_{ort}$  değerinin tüm mil hızlarında belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir (Şekil 9). 15 N yükte en büyük  $\mu_{ort}$  değerleri 5 mT ve 7.5 mT testlerde elde edildiği rahatlıkla test sonucu grafiklerinde görülmektedir (Şekil 9).

Ayrıca  $\mu_{ort}$  mil hızıyla değişimini daha iyi görebilmek için  $\mu_{ort}$   $F_1=15$  N için Şekil 9,  $F_2=40$  N için Şekil 10 ve  $F_3=65$  N için ise Şekil 11'de verilmiştir.

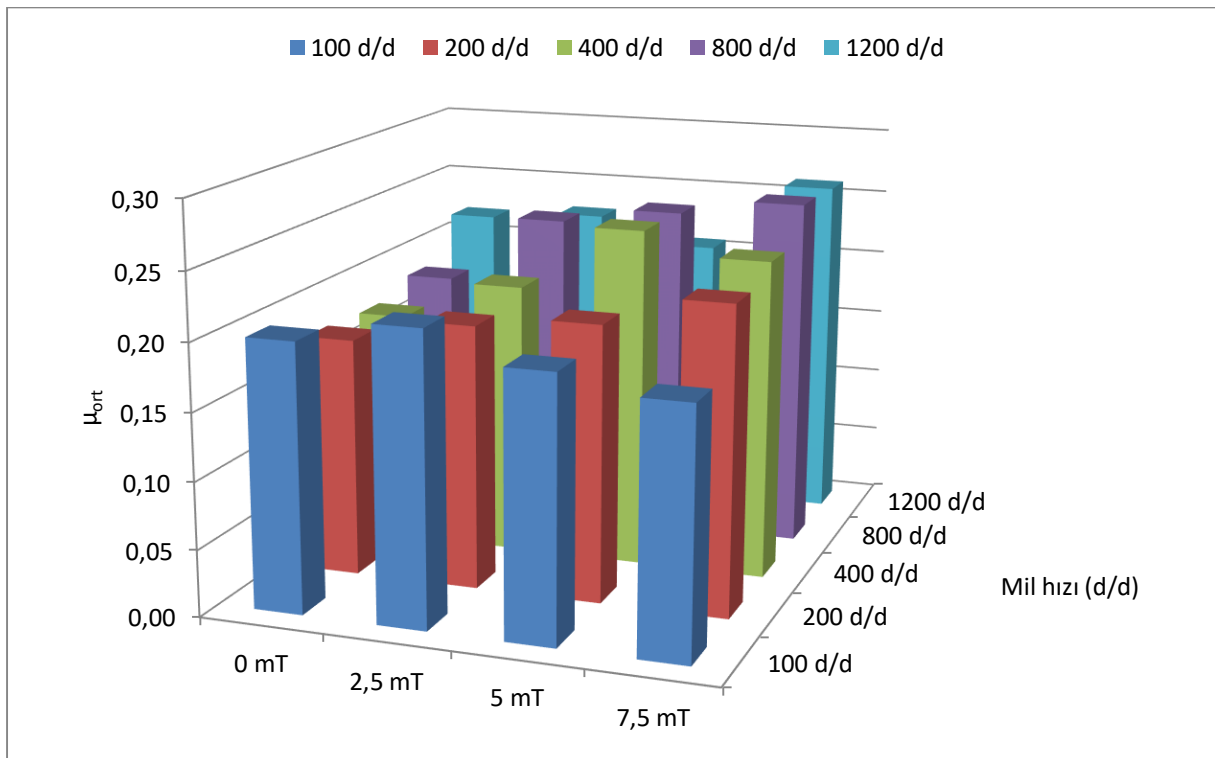
40 N yükte, manyetik alan uygulanmayan testlerde  $\mu_{ort}$  önce hafif bir düşüş göstermiştir. Daha sonra ise tekrar az bir artış sergilemiştir. 40 N yük için manyetik alan arttıkça  $\mu_{ort}$  değerinde farklı miktarlarda da olsa (bazı hızlarda düşüş de sergilemesine rağmen) genellikle arttığını söylemek mümkündür. 40 N yükte (Şekil 10) özellikle 200, 400 ve 800 d/d hızlardaki testlerde manyetik alan şiddeti artması ile  $\mu_{ort}$  değerlerinde artışlar gözlenmiştir.

65 N yükte manyetik alan uygulanmayan ve manyetik alan uygulanan deneylerde hızın artması ile  $\mu_{ort}$  hafif de olsa bir düşüş gözlenmiştir. Düşük hızlarda 2.5 ve 5 mT (100 ve 200 d/d) manyetik alansız testlerdeki  $\mu_{ort}$  değerine yakın değerler elde edilirken, 7.5 mT testinde ise daha düşük değerler elde edilmiştir. 800 ve 1200 d/d hızlarda ise manyetik alan uygulanan deneylerin tümünde manyetik alan uygulanmayan deneylerdekine göre daha büyük  $\mu_{ort}$  değeri sergilemiştir (Şekil 11).

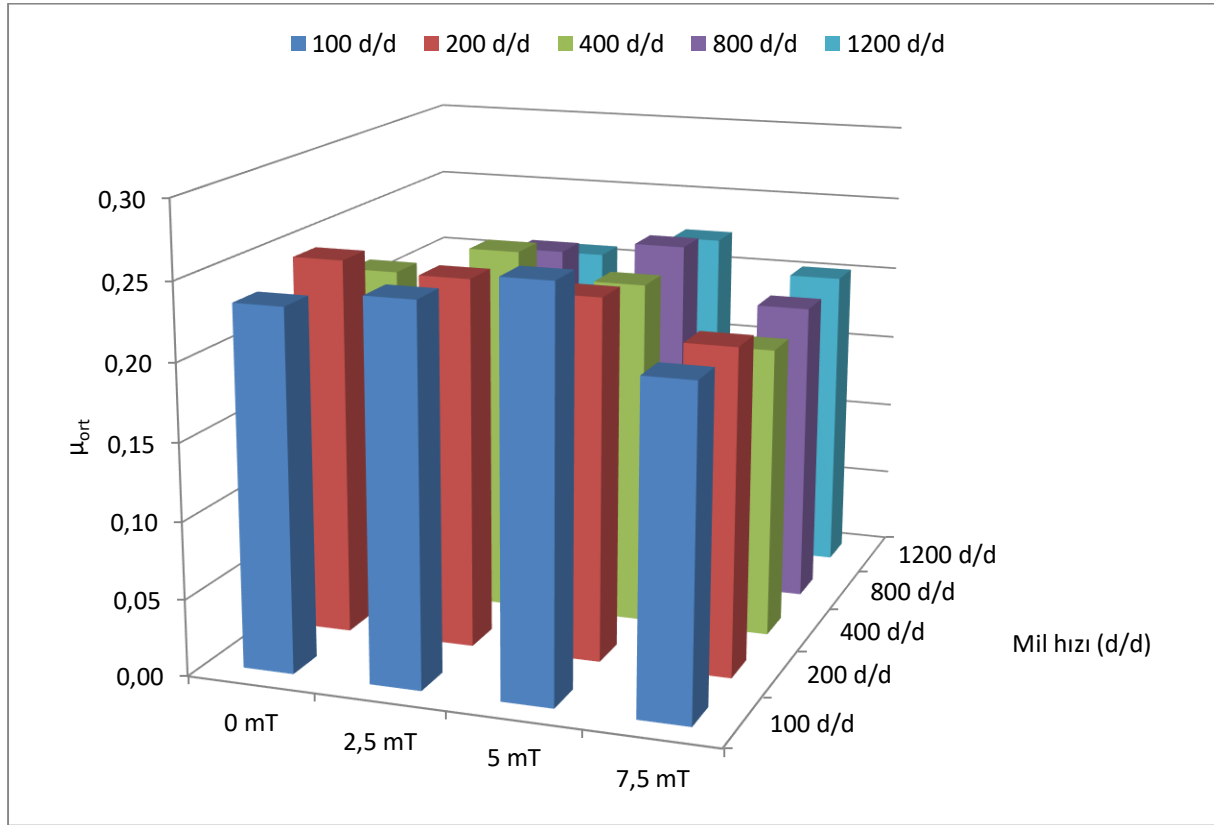




Şekil 9. 15 N yükteki  $\mu_{ort}$  değerleri ( values of the  $\mu_{ave}$  at 15 N load)



Şekil 10. 40 N yükteki  $\mu_{ort}$  değerleri ( values of the  $\mu_{ave}$  at 40 N load)



Şekil 11. 65 N yükteki  $\mu_{ort}$  değerleri ( values of the  $\mu_{ave}$  at 65 N load)

Çalışmada elde edilen  $\mu_{ort}$  değerleri genel olarak değerlendirildiğinde, test yataklarında sıvı yağ beslemeli olmadığından, T/M esaslı kendinden yağlamalı ve de-ney süresinin de çok kısa olduğu için sıvı filmler yağlama bölgesine göre büyük değerlerde olduğu görülmektedir. Bu da yataklarda oluşan yağlama rejimi olarak sınır yağlama ve/veya karışık yağlama olduğunun bir göstergesidir[31-34].

Kendinden yağlamalı sinter yatakların çalıştırılması için sınırlayıcı koşullar olarak PV faktörü tanımlanmaktadır. P, birim yatak yüzeyine uygulanan yük (MPa), V ise milin çevresel hızıdır(m/s). Bu tip yataklar için tavsiye edilen PV değeri 1.75 MPa m/s'dir[35]. Sunulan çalışmadaki PV değerleri ise Çizelge 1.'de verilmektedir. Çizelge 1.'deki değerler incelendiğinde kendinden yağlamalı sinter yataklar için tavsiye edilen değerlerden daha küçük olduğu rahatlıkla görülmektedir.

Çizelge 1. Testlerde Seçilen PV Değerleri (PV values selected in tests)

Test	PV	Test	PV	Test	PV
F <sub>1</sub> V <sub>1</sub>	0.007	F <sub>2</sub> V <sub>1</sub>	0.020	F <sub>3</sub> V <sub>1</sub>	0.032
F <sub>1</sub> V <sub>2</sub>	0.015	F <sub>2</sub> V <sub>2</sub>	0.040	F <sub>3</sub> V <sub>2</sub>	0.065
F <sub>1</sub> V <sub>3</sub>	0.030	F <sub>2</sub> V <sub>3</sub>	0.080	F <sub>3</sub> V <sub>3</sub>	0.130
F <sub>1</sub> V <sub>4</sub>	0.060	F <sub>2</sub> V <sub>4</sub>	0.159	F <sub>3</sub> V <sub>4</sub>	0.259
F <sub>1</sub> V <sub>5</sub>	0.090	F <sub>2</sub> V <sub>5</sub>	0.239	F <sub>3</sub> V <sub>5</sub>	0.389

Testlerde seçilen yatak büyüklüğü, yük ve hıza göre hesaplanan PV değerlerine göre deneylerde elde edilen  $\mu_{ort}$  değerlerinin değişimi Şekil 12-14'te verilmektedir.

F<sub>1</sub>=15 N yükte artan PV değeri ile manyetik alan uygulanmayan testlerde  $\mu_{ort}$  değerinde bir düşüş gözlemlenirken, 2.5 mT testlerinde bir artış, 5 mT ve 7.5 mT testlerinde çok fazla bir değişim olmamakla beraber hem düşüş hem de artışlar sergilemektedir(Şekil 12).

F<sub>2</sub>=40 N yükte artan PV değeri ile  $\mu_{ort}$  değerinde manyetik alan uygulanmayan testlerde ise önce bir düşüş, sonra bir artış göstermektedir. 2.5 mT testlerinde bir önce artış, sonra ise bir düşüş sergilemiştir. 5 mT testlerinde bir artış sonra tekrar bir düşüş sergileyerek ilk PV değerine yakın bir  $\mu_{ort}$  değeri sergilemiştir. 7.5 mT testlerinde  $\mu_{ort}$  değerinde önce bir artış sonra az da olsa bu artışı sürdüren bir değişim sergilemiştir(Şekil 13).

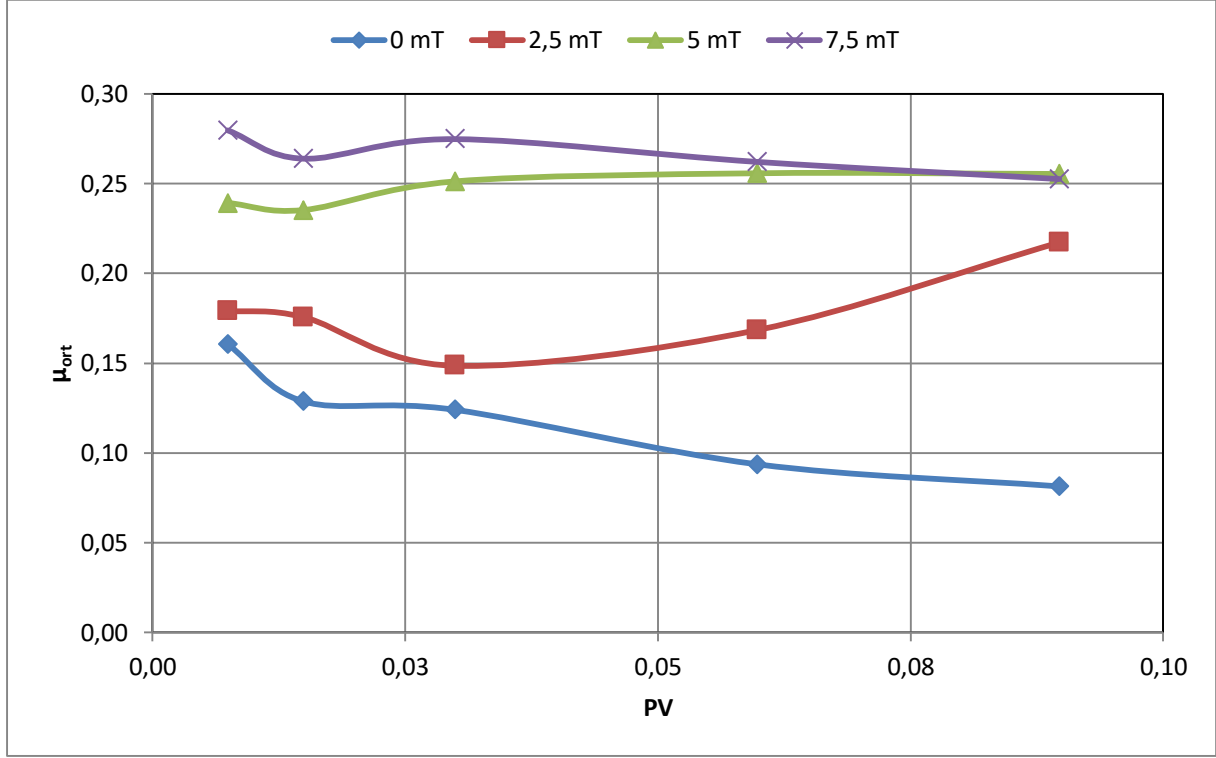
F<sub>3</sub>=65 N yükte artan PV değeri ile  $\mu_{ort}$  değerinde manyetik alan uygulanmayan, 2.5 mT ve 5 mT testlerinde az da olsa bir düşüş sergilerken, 7.5 mT testlerinde ise çok fazla bir değişim sergilememiştir(Şekil 14).

#### 4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER (CONCLUSIONS and SUGGESTIONS)

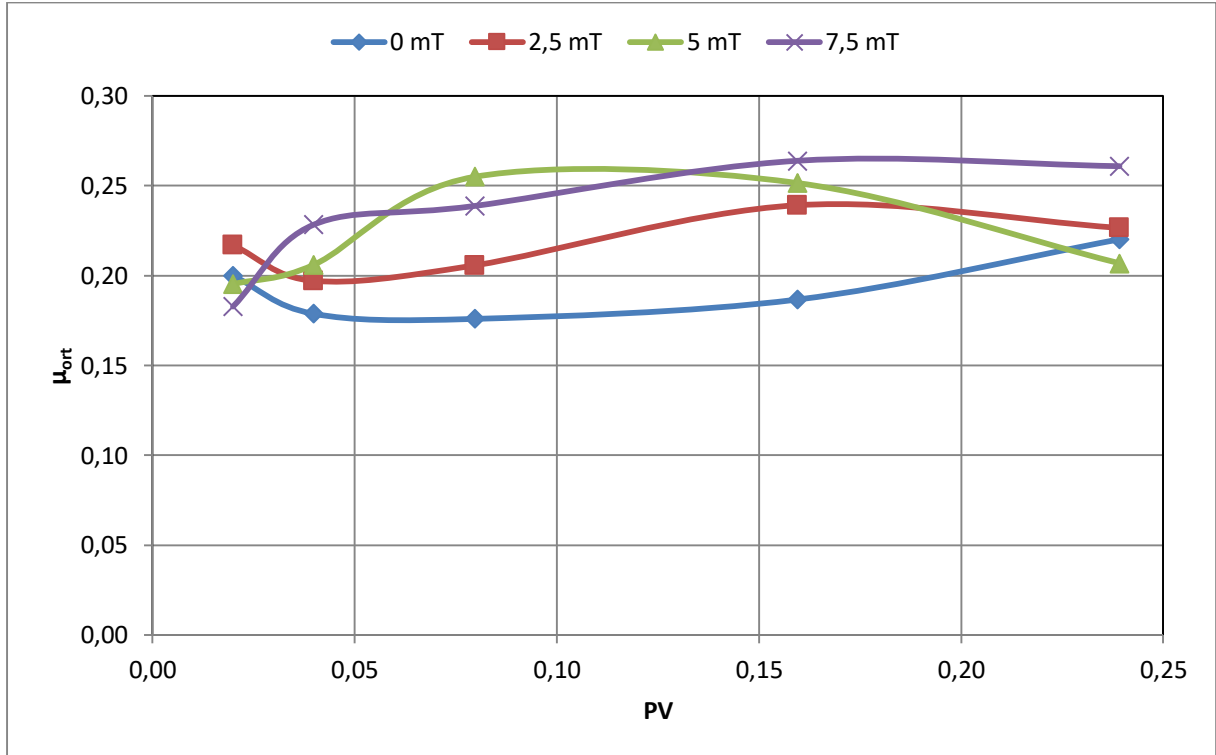
Çalışmada test yatağı olarak özellikle düşük güçteki elektrik motorlarında yaygın olarak kullanılan, çalışma sırasında ilave yağlama gerektirmeyen kendinden yağlamalı T/M esaslı bronz esaslı radyal kaymalı yataklar tercih edilmiştir. Test yükü olarak F<sub>1</sub>=15 N,

$F_2=40$  N ve  $F_3=65$  N sabit yükler seçilmiştir. Test mili hızı olarak ise 100, 200, 400, 800 ve 1200 d/d hızları

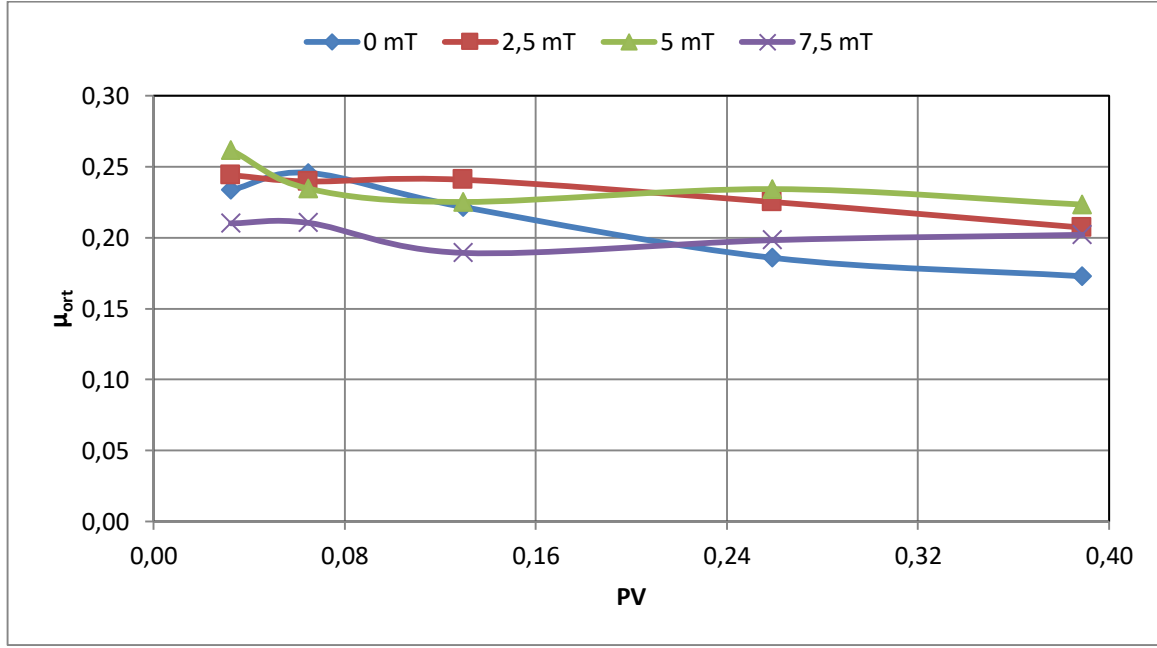
seçilmiştir. Testlerde uygulanacak olan manyetik alan şiddet değeri olarak ise 2.5 - 5 ve 7.5 mT seçilmiştir.



Şekil 12. 15 N yükteki  $\mu_{ort}$ 'un PV ile değişimi (variation of values of the  $\mu_{ave}$  with PV at 15 N load)



Şekil 13. 40 N yükteki  $\mu_{ort}$ 'un PV ile değişimi (variation of values of the  $\mu_{ave}$  with PV at 40 N load)



Şekil 14. 65 N yükteki  $\mu_{ort}$ 'un PV ile değişimi (variation of values of the  $\mu_{ave}$  with PV at 65 N load)

Çalışmada elde edilen ortalama sürtünme katsayıları değerleri genel olarak değerlendirildiğinde, test yatakları sıvı yağ beslemeli olmadığı, T/M esaslı kendinden yağlamalı olduğu ve deney süresinin de çok kısa olduğu için sıvı filmlili yağlama bölgesine göre daha büyük değerlerde olduğu görülmektedir. Bu da yataklarda oluşan yağlama rejimi olarak sınır yağlama olduğu söylenebilir.

Kendinden yağlamalı sinter yatakların çalıştırılması için sınırlayıcı koşullar olarak tanımlanan PV faktörü [35] olan 1.75 MPa m/s olup çalışmada seçilen PV değerleri, T/M esaslı kendinden yağlamalı sinter yataklar için tavsiye edilen daha değerlerden küçük değerlerdedir.

Manyetik alana maruz bırakılmayan deneylerde sürtünme katsayısı değişimi yükün artması ile ortalama sürtünme katsayısında genel anlamda bir artış olduğu görülmektedir.

En düşük yük olan 15 N'da özellikle manyetik alan uygulanmayan deneylerde hızın artması ile  $\mu_{ort}$  değerinde düşüş, manyetik alan arttıkça  $\mu_{ort}$  değerinin tüm mil hızlarında belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Ayrıca en düşük yük olan 15 N'da en büyük  $\mu_{ort}$  değerleri, 5 mT ve 7.5 mT testlerde elde edilmiştir. 40 N yükte, manyetik alan uygulanmayan testlerde  $\mu_{ort}$  önce hafif bir düşüş, sonra tekrar az bir artış sergilemiştir. 40 N yük için manyetik alan arttıkça  $\mu_{ort}$  değerinde farklı miktarlarda da olsa (bazı hızlarda bir miktar düşüş de sergilemesine rağmen) genellikle arttığını söylemek mümkündür. 65 N için manyetik alan uygulanmayan manyetik alan uygulanan deneylerde hızın artması ile  $\mu_{ort}$  değerinde hafif de olsa bir düşüş gözlenmiştir. Düşük hızlarda, 2.5 ve 5 mT (100 ve 200 d/d) manyetik alansız testindeki  $\mu_{ort}$  değerine yakın değerler elde edilirken, 7.5 mT testinde ise daha düşük değerler sergilemiştir. 800 ve 1200 d/d hızlarda ise manyetik alan

uygulanan deneylerin tümünde manyetik alan uygulanmayan deneylerdekine göre daha büyük  $\mu_{ort}$  değeri sergilemiştir.

Sonuç olarak genellikle bu çalışmada seçilen deney şartlarında manyetik alanın, T/M esaslı kendinden yağlamalı bronz yatakta oluşan ortalama sürtünme katsayısını arttırdığı söylenebilir. Bu değişime manyetik alan şiddetinin değeri, yatak yükü ve mil hızının etkisinin olduğunu da söylemek mümkündür.

Manyetik alanın uygulandığı deneylerde elde edilen  $\mu_{ort}$  değerinde artışa, kendinden yağlamalı yataklara ilave sıvı yağ beslemesi yapılmadığından, yeterli bir yağ filminin oluşmadığı, çoğunlukla sınır yağ filminin oluştuğu, manyetik alan etkisi ile milin yatak yüzeyine daha fazla yaklaşacağı ve bölgesel temaslara manyetik alanın herhangi bir etkisi olup olmayacağı da araştırılmalıdır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

1130-YL-05 No'lu Proje ile bu çalışmayı maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Karacaörenli, A., "50 Hz Şebeke frekanslı elektrik alanının sıçanlarda yavru gelişimi üzerine etkileri", Süleyman Demirel Üniversitesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, (2007).
- [2] Bold, A., Toros, H. ve Şen O., "Manyetik alanın insan sağlığı üzerindeki etkisi", *III. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu*, İstanbul, 62-68, (2003).
- [3] <http://hbogm.meb.gov.tr/MTAO/3ElektrikBilgisi/unite-16.pdf>

- <https://hbogm.meb.gov.tr/MTAO/1ElektrikMakLab/unit/e5.pdf>
- [4] <http://www.elektrikde.com/Asenkron-motor-nedir-kullanim-alanlari-nelerdir.html>
- [5] Kuş, H., “Bronz esaslı seramik takviyeli fren balatalarının performansının geliştirilmesi”, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2014).
- [6] German, R.M., “Powder metallurgy & particulate materials processing, toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri”, Çeviri Editörleri Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları: 05, *Uyum Ajans*, 573, Ankara, (2007).
- [7] Özçelik, S., “Cu ve Fe Esaslı T/M yatak malzemelerinin aşınma özelliklerinin deneysel incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, (2007).
- [8] ASM Metals Handbook, “Powder metal technologies and applications”, *ASM International*, 7, 1146, USA, (1998).
- [9] Tunay, R.F., Durak, E., “Manyetik alana maruz kalan t/m esaslı yatakların tribolojik özellikleri”, *VI. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi*, Konya, 341-350, (2011).
- [10] Atak, Y., “Kendinden yağlamalı grafit katkılı bronz yatakların aşınma davranışının incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2009).
- [11] Zsidai, L., Baets, P.De., Samyn, P., Kalacska, G., “The tribological behavior of engineering plastics during sliding friction investigated with small-scale specimens”, *Wear*, 253: 673–688, (2002).
- [12] Daban, Z., “Manyetik alana maruz t/m esaslı bronz kaymalı yatakların sürtünme özelliklerinin incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, (2018).
- [13] Raymond, O. K. J., “An investigation of shaft current in a large sleeve bearing induction machine”, *Doktora Tezi*, McMaster University, Canada, (1999).
- [14] Sohre, J. S., Nippes, P., “Electromagnetic shaft currents in turbomachinery -an update, Part II: Magnetics and Dernagnetization”, 25th Symposium on Safety in Ammonia Plants and Related Facilities, *American Institute of Chemical Engineers*, Portland, Oregon, (1978).
- [15] <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/asekron-motorlar-1-bolum/12177>  
<http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/elektromanyetik-alan-gercegi/4455#ad-image-0/>
- [16] Kadioğlu, M., “Manyetik alan etkisindeki yuvarlanma elemanlı yatakların tribolojik özelliklerinin incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, (2016).
- [17] <http://www.skf.com/binary/68-134586/13459-EN-Rolling-bearings-and-seals-in-electric-motors-and-generators>.
- [18] Prashad, H., “Diagnosis of failure of rolling-element bearings of alternators - a study”, *Wear*, 198: 46-5(1996).
- [19] Djeddi, M., Granjon, P., Lepretre, B., “Bearing fault diagnosis in induction machine based on current analysis using high-resolution technique”, *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, Cracow, Poland, 23-28, (2007).
- [20] Singh, S., Kumar, A., Kumar, N., “Motor current signature analysis for bearing fault detection in mechanical systems”, *Procedia Materials Science*, 6: 171–177, (2014).
- [21] Prashad, H., “Determination of magnetic flux density on the surfaces of rolling element bearings as an indication of the current that has passed through them - an investigation”, *Tribology International*, 32: 455–467, (1999).
- [22] Uysal, A., “Tek sıra sabit yuvarlanma elemanlı yataklarda sürtünme kaybının deneysel olarak incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, (2006).
- [23] [http://www.rkbbearings.com/admin/gest\\_docs\\_res/-attach1/1271884609.pdf](http://www.rkbbearings.com/admin/gest_docs_res/-attach1/1271884609.pdf).
- [24] Kam, M., Saruhan, H., Kara, F., “Isıl işlem görmüş millerin dinamik davranışlarının deneysel analizi”, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5 (1): 81–90, 2016.
- [25] Jung, J., Lee, S. B., Lim, C., Cho, C., Kim, K., “Electrical monitoring of mechanical looseness for induction motors with sleeve bearings”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31: 1377-1386, (2016).
- [26] Kam, M., Saruhan, H., “Kriyojenik işlem uygulanmış millerin yuvarlanmalı ve kaymalı yataklarda deneysel titreşim analizi”, *Politeknik Dergisi*, 22(1): 129-134, (2019).
- [27] Saruhan, H., Kam, M., Kara, F., “Dynamic behavior analysis of rotor supported by damped rolling element bearing housing”, *Journal of Polytechnic*, 20(1): 159-164, (2017).
- [28] Saruhan, H., “Experimental spectral analysis of split sleeve bearing clearance effect on a rotating shaft system”, *Electronic Journal of Machine Technologies*, 13(4): 1-8, (2016).
- [29] Aleutdinova, M.I., Fadin, V., Kolubaev, A.V., Aleutdinova, V.A., “Contact characteristics of metallic materials in conditions of heavy loading by friction or by electric current”, *Friction and Wear Research*, 2: 22-28, (2014).
- [30] Raman, R. Chennabasavan, T.S., “Experimental investigations of porous bearings under vertical sinusoidally fluctuating loads”, *Tribology International*, 31(6): 325-330, (1998).
- [31] <http://www.olcum.org/images/docs/elektromanyetik/4.pdf>
- [32] Kaneko, S., “Porous oil bearings”, 1993, *Japanese Journal of Tribology*, 38(9): 1141-1150.
- [33] Cusano, C., Phelan R.M., “Experimental investigation of porous bronze bearings”, *Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology*, 95: 173-180, (1973).
- [34] Durak, E., “Experimental investigation of porous bearings under different lubricant and lubricating conditions”, *KSME International Journal*, 17(9): 1276-1286, (2003).
- [35] Soydan Y., Ulukan L., “Temel triboloji sürtünme- aşınma yağlama bilimi ve teknolojisi”, *Tagem Kopisan Ltd.*, Sakarya, (2013).
- [36] Bhushan, B., “Modern tribology” Handbook I, Principles of Tribology, II, Materials, Coatings, and Industrial Applications Columbus, Ohio, ABD, *CRC Press LLC*, ISBN: 0-8493-8403. (2001).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN:1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Biomechanical effects of four different configurations in salter harris type 4 distal femoral epiphyseal fractures

*Salter harris tip 4 distal femoral epifiz kırıklarında dört farklı konfigürasyonun biyomekanik etkileri*

(Author(s)): Kadir GÖK<sup>1</sup>, Sermet İNAL<sup>2</sup>, Arif GÖK<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-5736-1884

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-0868-5633

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-3309-6921

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Gök K., İnal S. ve Gök A., “Biomechanical effects of four different configurations in salter harris type 4 distal femoral epiphyseal fractures”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 151-159, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.474787

# Salter Harris Tip 4 Distal Femoral Epifiz Kırıklarında Dört Farklı Konfigürasyonun Biyomekanik Etkileri

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Kadir GÖK<sup>1\*</sup>, Sermet İNAL<sup>2</sup>, Arif GÖK<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Manisa Celal Bayar University, Hasan Ferdi Turgutlu Technology Faculty, Department of Mechanical Engineering, 45400 Manisa, Turkey

<sup>2</sup>Kutahya Health Sciences University, School of Medicine, Department of Orthopaedic Surgery, Campus of Evliya Celebi, 43100 Kutahya/Turkey

<sup>3</sup>Amasya University, Technology Faculty, Department of Mechanical Engineering, 05000 Amasya/Turkey

(Geliş/Received : 25.10.2018 ; Kabul/Accepted : 02.03.2019 )

## ÖZ

Bu çalışmada, distal femurun Salter Harris (SH) Tip 4 epifiz kırığında redüksiyon sonrası stabilizasyon için kullanılan Paralel Kirshner telleri (K teli), Paralel vidalar, Üstte K teli-Altta vida, Üstte vida-Altta K teli olmak üzere 4 farklı konfigürasyonun, aksiyel, rotasyonel ve eğme kuvvetleri altında, biyomekanik etkilerini tanımlayıp hangisinin daha avantajlı olduğu araştırıldı. 4 farklı konfigürasyon SolidWorks programı ile modellendi ve bilgisayar destekli sayısal analizler sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirildi. Herbir konfigürasyon için, ağ süreci, sınır şartları ve malzeme modeli sonlu elemanlar yazılımında uygulandı. Buna ek olarak, epifiz plağının gelişimindeki von-Mises gerilme değerleri, vidalar ve K-tellerindeki gerilme değerleri hesaplanmıştır. Frontal, sagittal ve transvers düzlemde bükme (varus-valgus açılımı, ön-arka açısal kapanma) ve burulma kuvvetleri altındaki fizik çizgi üzerinde tüm konfigürasyonlarda gerilme değerlerinde genel olarak yakın bir eğilim vardır. Eksenel kuvvetler düşünüldüğünde, en yüksek gerilme, fizikte paralel K-telleri konfigürasyonunda bulunurken, en düşük gerilme paralel vida konfigürasyonunda bulundu. Paralel vida konfigürasyonunda fiksasyon tipinin kullanılması avantajlı bulunmuştur. Ek olarak, SH tipi 4 epifiz kırıklarında, K-teli konfigürasyonunda fiksasyon tipi dezavantajlı bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Biyomekanik, SH tip 4 epifiz kırığı, kirshner teli, sonlu elemanlar analizi, epifiz plağı.

## Biomechanical Effects of Four Different Configurations In Salter Harris Type 4 Distal Femoral Epiphyseal Fractures

### ABSTRACT

In this study, the biomechanical effects of four different configurations (Parallel K wires, Parallel Screw, Upper K wire-Lower Screw, Upper Screw-Lower K wire), which are used for stabilizing Salter-Harris (SH) Type 4 epiphyseal fracture of distal femur after reduction process, on the epiphyseal plate has been investigated under axial, rotational and bending forces in order to determine the most advantageous configuration. The four different configurations have been modeled by using SolidWorks and computer-aided numerical analyses were performed by finite element analysis software. The mesh process, boundary conditions and material model have been applied in finite element analysis software for each configuration. In addition, von-Mises stress values on epiphyseal plate, screws and K wires have been calculated. There is a general near trend on stress values in all configurations on physis line under bending (varus-valgus angulation, anterior-posterior angulation) and torsional forces in the frontal, sagittal and transverse plane respectively. Considering the axial forces, the highest stress was found on parallel K-wires configuration in physis while the lowest stress was found in parallel screw configuration. It has been found particularly advantageous to use fixation type in parallel screw configuration. In addition, in SH type 4 epiphyseal fracture, fixation type is found to be disadvantageous in K wire configuration.

**Keywords:** Biomechanics, Salter Harris Type 4, Kirschner wire, finite element analysis, epiphyseal plate.

### 1. INTRODUCTION

Classification for pediatric physeal fractures was proposed by Salter and Harris (SH) in 1963 [1]. The classification of physeal plate injuries in 5 types, proposed in their report, is related to the mechanism of injury, the relationship of the fracture line to the various cellular layers of the physeal plate, and the prognosis

concerning disturbance of growth [1, 2]. SH type 4 epiphyseal fracture of the distal femur has high risk especially in growth interruption and for other complications [1, 3-6]. There are some factors considered as the cause of this situation as follows. The age of the person, type of fracture, degree of axial loading or shear stress, sinuous structure of physis, quality of fracture reduction process and fixation shape [7-10]. It has been suggested that the main cause of angulation at the fracture line and growth complications is physeal bar

\*Sorumlu Yazar (Corresponding author)  
e-posta : kadir.gok@cbu.edu.tr

formation by considering its histology [7, 11]. In recent studies, it has been shown that an injury with a 7-9 % ratio incross-sectional area of the physis line can disrupt the growth [12, 13]. Type 4 epiphyseal injuries carry a bad prognosis unless the epiphyseal plate is completely realignment (1). In this case, intraarticular SH type 4 fractures are almost always need surgical reduction to prevent deformity [14]. In the treatment of SH type 4 epiphyseal fracture of distal femur, the fixation with partially threaded screw or Kirschner wire (K wire) applied parallel to the joint and without passing through the physis line is recommended [10, 15, 16]. The size, number, location of the screws or K wires used depending on decision of the surgeon can increase or decrease the physical injuries as well as the stability of fracture. Although it has been stated that the purpose of this type of fracture treatment is obtaining anatomic reduction and preventing additional injuries of the physis, the most reliable technique has not been identified yet [7, 11, 15, 17]. The aim of our study; was to investigate the different configurations of K wires and screws used in distal femur SH type 4 epiphyseal fracture, for stabilization after reduction; under axial, rotational and bending forces, and define the biomechanical effects on the epiphyseal plate and decide which one was more advantageous. The configuration with minimal stress on the epiphyseal plate was investigated.

## 2. COMPUTER AIDED FINITE ELEMENT ANALYSIS AND MODELLING

Three dimensional modelling (3D) of biologic models is very popular in nowadays. Data such as Magnetic resonance imaging (MRI) and multislice computed

tomography (CT) can be processed by using 3D modelling. The computer aided numerical analysis to stabilization of the different configurations after reduction during fixation was performed using AnsysWorkbench software based on finite element method (FEM). FEM is very important to develop of new surgical techniques. It is also used as a reliable technique for validation of experimental or analytical results. In addition, several scientists similarly examined the optimal configuration, implant materials, fatigue behavior of implant materials, metal turning, bone drilling and bone screwing process using the computer aided FEA tool [18-24].

### 2.1. 3D Modelling

The human femoral model was scanned using 3D scanner and point cloud was obtained. After that, 3D model of femur was created using point cloud data by Geomagic Studio 10 program. This femur model was scaled for taking femur dimensions of a child into account, and SH Type 4 fracture for single configuration was created using SolidWorks program as seen in Figure 1. The diameter of screw used in configuration was  $\varnothing 4 \times 1.75 \times 22$  cancellous screw (Figure 2).

### 2.2. Finite Element Analysis (FEA)

The computer aided numerical analysis used for stabilization of four configurations after reduction process during fixation was performed using AnsysWorkbench software. 3D CAD models of four configurations (Figure 1) were imported into AnsysWorkbench software to prepare the FEA. Load, boundary conditions and material models were defined in AnsysWorkbench.

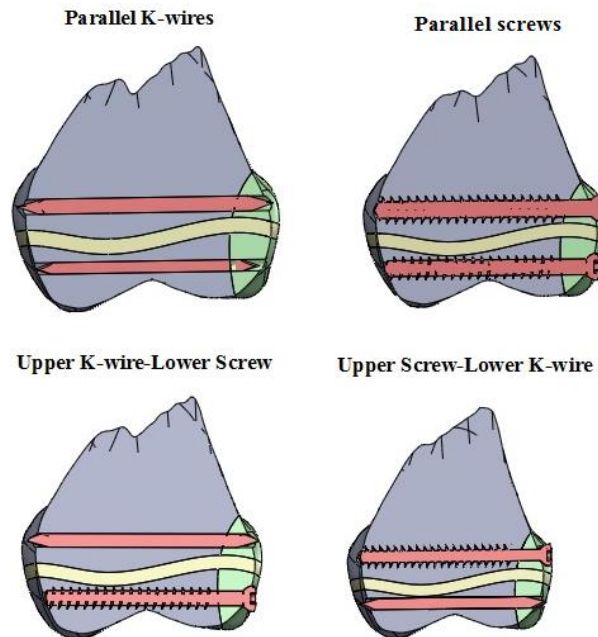
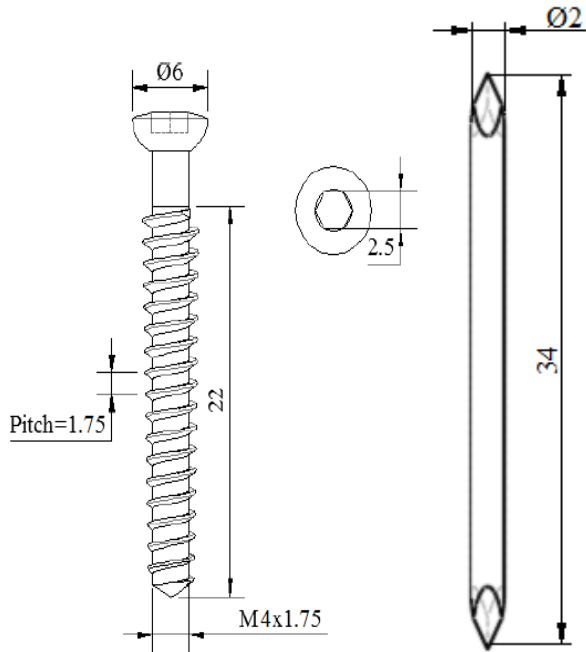


Figure 1. Four different configurations for SH Type 4 fracture





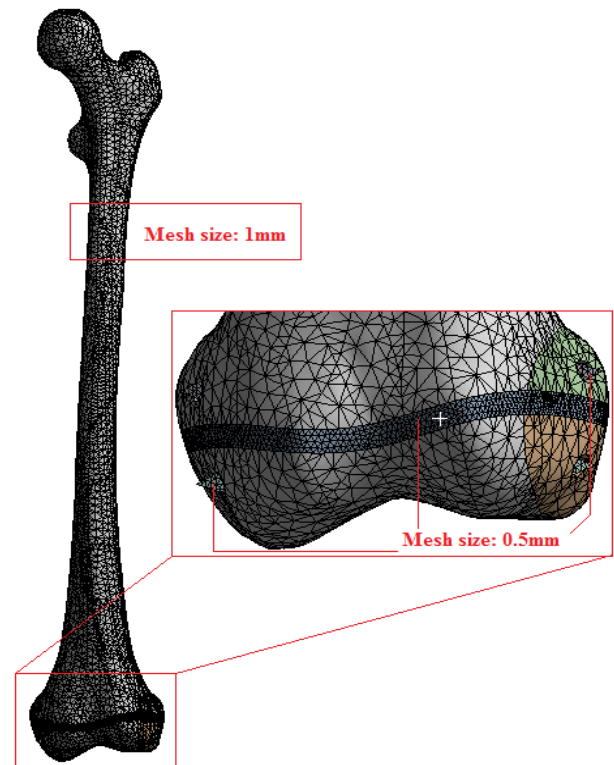
**Figure 2.** a)  $\text{Ø}4 \times 1.75 \times 22$  cancellous screw, b) K wire

**2.2.1. Loading and boundary conditions**

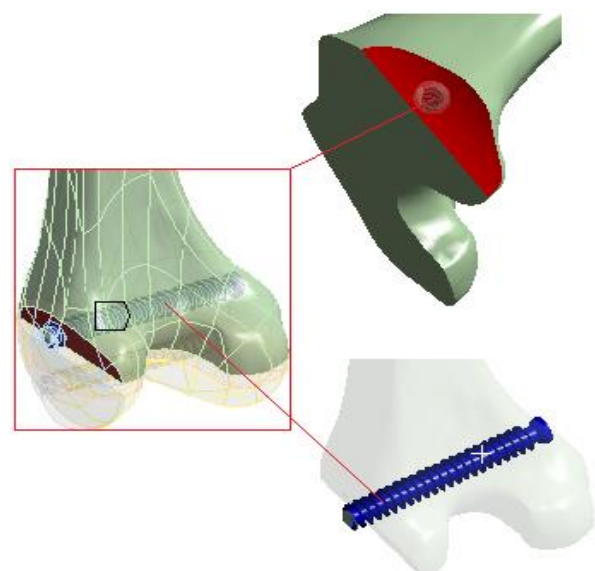
The mesh operation was performed using tetrahedrons elements for FEA modeling after importing four different 3D model configurations into Ansys Workbench software (Figure 3a). The FEA model has 210378 nodes and 134305 elements. While the mesh density for femur and femur fragments were inputted as 1mm, K wires, epiphyseal plate and screw were inputted as 0.5mm. Axial, bending and rotational loading were applied within four configurations. A load of 350N in axial direction was applied to the femoral head and it was fixed from the distal femoral condyles for axial loading as seen in Figure 4. According to this figure, bending forces were applied to the epiphyseal plate in varus and valgus directions, and femur was fixed from metaphysis and diaphysis part. Besides, bending forces were applied to the epiphyseal plate in anterior and posterior directions, and femur was fixed from metaphysis and diaphysis part. Finally, torsional force was applied to the epiphyseal plate around the z axis in CCW, and femur was fixed from metaphysis and diaphysis part.

Contact types between bone and bone interaction, K wires and bone interaction or screw and bone interaction were defined as a frictional contact (Figure 3b). Friction coefficients were taken as 0.46 for bone and bone interactions and 0.42 for K wires and bone interaction or screw and bone interaction, respectively [25]. The contact type between epiphyseal plates was defined as a frictionless contact. Besides, the contact type between epiphyseal plate and bone was defined as bonded in Figure 3c [26]. Finally, as it can be seen in Figure 5,

convergent analysis was conducted. The force convergence was commonly used in non-linear analyses. If solution is not convergent, there is a problem. For a good solution, purple line on the convergent graph should be acted on the cyan line. This status is dependent the boundary conditions such as friction, contact type and others.



a)



b)

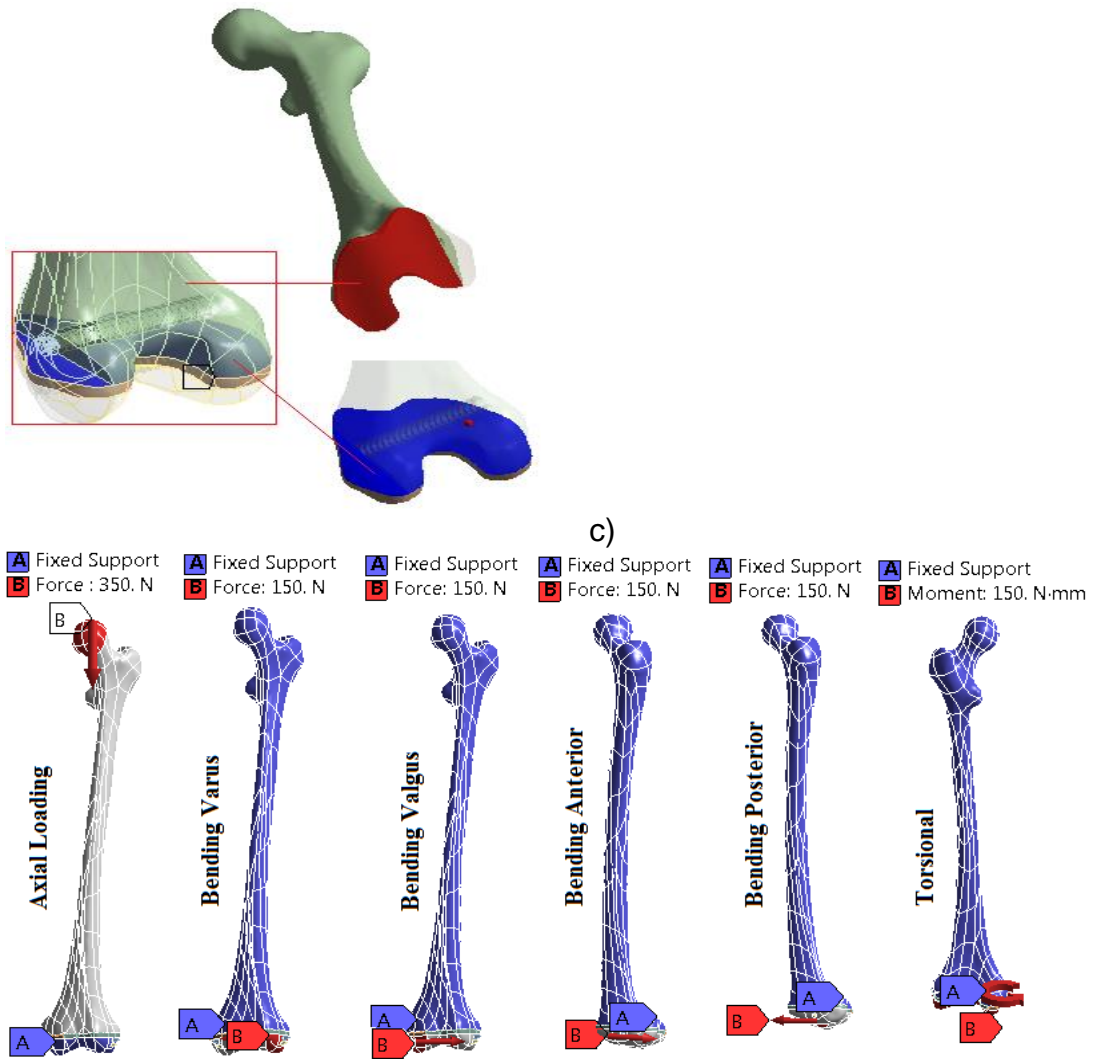


Figure4. Loading types for two configurations

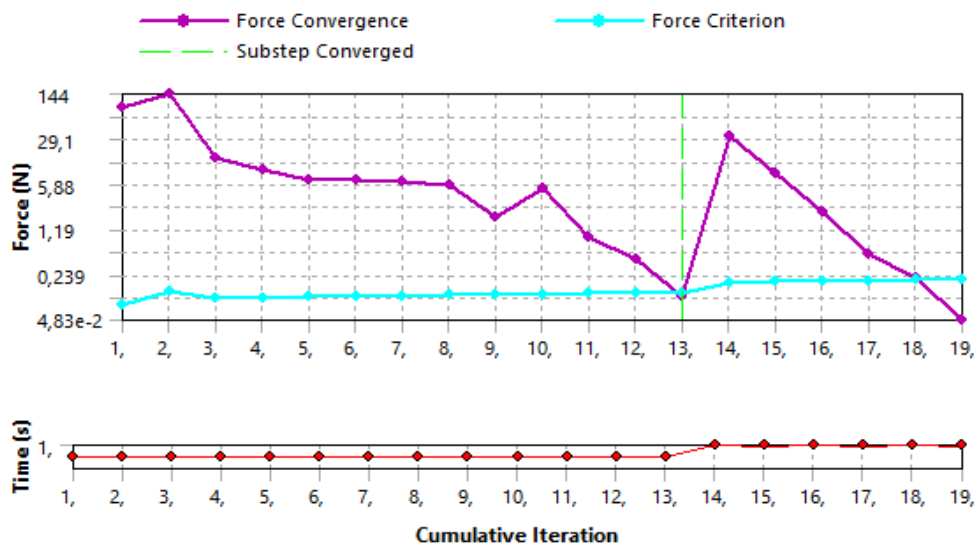


Figure 5. Convergence analysis

**2.3. Material Model**

Mechanical properties of bone and epiphyseal plate used in the Finite Element (FE) analyses were given in Table 1. The stainless steel was selected for K wires and screws used in FEA. The mechanical properties of K wires and screw were obtained from AnsysWorkbench Material Library [27]. Linear isotropic material model was used for mechanical behaviors of K wires, bone, epiphyseal plate and screw. The elasticity modulus of the epiphyseal plate was assumed as soft tissue when compared with other materials.

**Table 1.** Mechanical properties of K wires, screw, bone and epiphyseal plate used in FEA [28, 29]

Parameters	Bone	Epiphyseal plate	Stainless Steel
Density (kg m <sup>-3</sup> )	2100		7750
Young's Modulus (MPa)	17000	5	193000
Yield Strength (MPa)	135		207
Ultimate Strength (MPa)	148		586
Poisson's Ratio	0.35	0.46	0.31

**3. RESULTS**

After entering the loading and boundary conditions, FE analyses were solved. According to FEA results, maximum stress values on epiphyseal plate upon FEA results, K wires and screw were given in Tables 2 and 3, Table 4, respectively. These stress values were evaluated according to von Mises criterion. The Von Mises model is generally used in ductile materials. As seen in Table 2, there is a general near trend on stress values in all configurations on physis line under bending (varus-valgus angulation, anterior-posterior angulation) and torsional forces in the frontal, sagittal and transverse plane respectively. Considering the axial forces, the highest stress was found on parallel K-wires configuration in physis while the lowest stress was found in parallel screw configuration. Stress distributions occurring in epiphyseal plate under axial loading in various configurations are seen in Figure 6. The deformations values on epiphyseal plate were given in Table 5. Figure 7 was presented images of deformations values on epiphyseal plate.

**Table 2.** Stress values occurring in epiphyseal plate (MPa)

No	Fixation Type	Epiphyseal plate					
		Axial	Bending (Varus)	Bending (Valgus)	Bending (Anterior)	Bending (Posterior)	Torsional
1	Parallel K wires	4.24	1.17	1.19	1.28	0.98	0.09
2	Parallel Screw	4.01	1.20	1.22	1.27	0.97	0.09
3	Upper K wire-Lower Screw	4.02	1.20	1.23	1.28	0.97	0.09
4	Upper Screw-Lower K wire	4.15	1.20	1.21	1.24	0.88	0.08

**Table 3.** Stress values occurring in Upper K wires or screws (MPa)

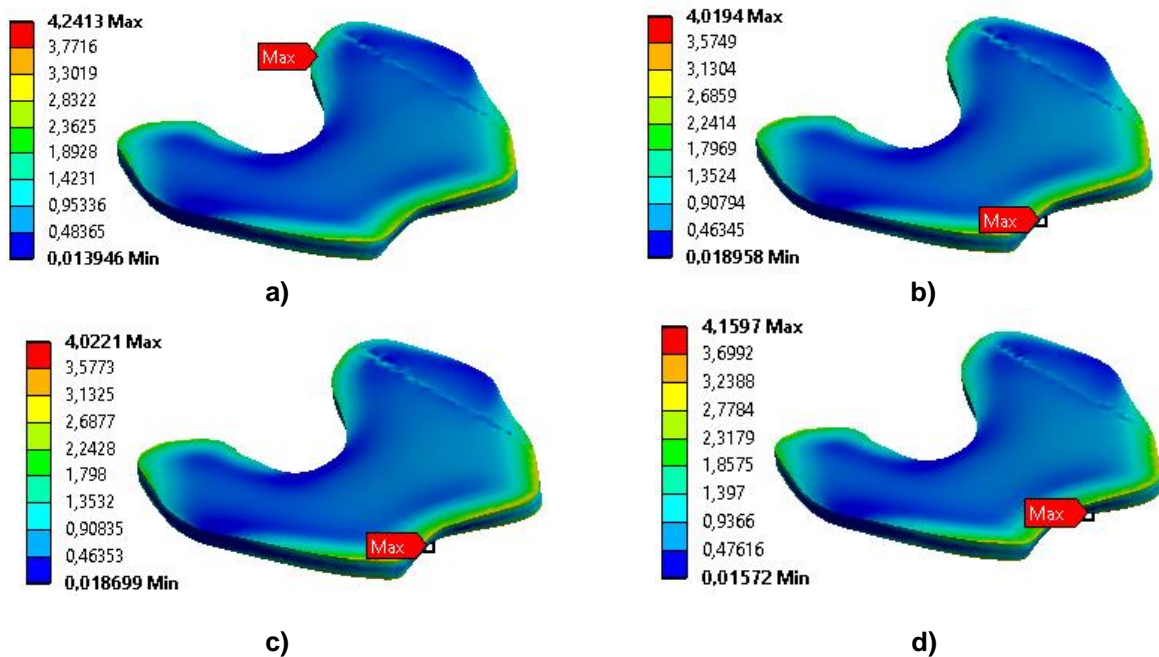
No	Fixation Type	Upper K wires or Upper Screw					
		Axial	Bending (Varus)	Bending (Valgus)	Bending (Anterior)	Bending (Posterior)	Torsional
1	Parallel K wires	170.51	38.20	47.86	49.20	60.36	3.17
2	Parallel Screw	164.90	3.15	2.98	1.59	1.16	0.17
3	Upper K wire-Lower Screw	445.03	4.81	4.89	0.80	0.99	0.17
4	Upper Screw-Lower K wire	152.93	2.99	2.83	1.43	1.40	0.14

**Table 4.** Stress values occurring in Lower K wires orLower screws (MPa)

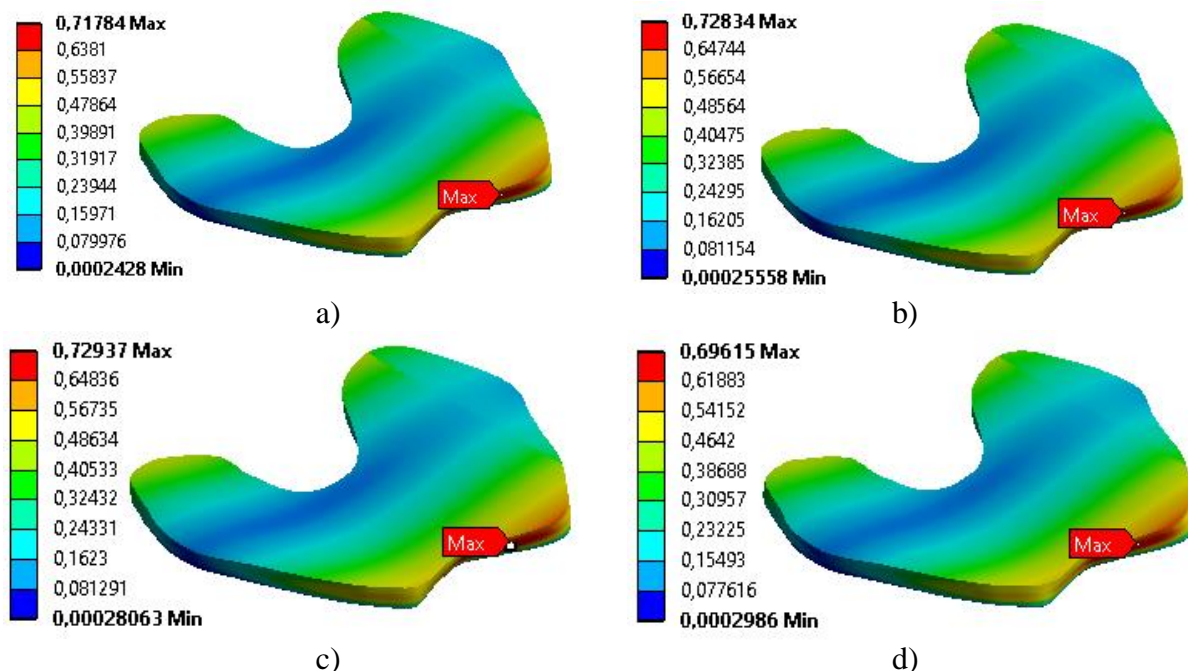
No	Fixation Type	Lower K wires or Lower Screw					
		Axial	Bending (Varus)	Bending (Valgus)	Bending (Anterior)	Bending (Posterior)	Torsional
1	Parallel K wires	6.50	31.89	35.50	24.25	24.18	1.22
2	Parallel Screw	10.50	44.75	52.93	27.20	27.83	1.99
3	Upper K wire-Lower Screw	10.69	44.46	51.05	27.27	27.82	1.63
4	Upper Screw-Lower K wire	4.85	41.27	38.01	30.34	32.42	1.20

**Table 5.** Deformation values occurring in epiphyseal plate (MPa)

No	Fixation Type	Epiphyseal plate
		Axial
1	Parallel K wires	0,71
2	Parallel Screw	0,72
3	Upper K wire-Lower Screw	0,72
4	Upper Screw-Lower K wire	0,69



**Figure 6.** Stress values occurring at different configurations under the axial loading, a) Parallel K wires, b) Parallel screws, c) Upper K wire-Lower Screw, d) Upper Screw-Lower K wire



**Figure 7.** Deformation values occurring at different configurations under the axial loading, a) Parallel K wires, b) Parallel screws, c) Upper K wire-Lower Screw, d) Upper Screw-Lower K wire

Table 6 and Table 7 show the contact pressure distributions of medial and lateral epiphyseal plates. The contact pressure values occurring in parallel screw

configuration is found lower than other configurations for different loading conditions.

**Table 6.** Contact pressure of medial epiphyseal plate (MPa)

No	Fixation Type	Epiphyseal plate					
		Axial	Bending (Varus)	Bending (Valgus)	Bending (Anterior)	Bending (Posterior)	Torsional
1	Parallel K wires	8,57	1,69	3,04	3,41	2,24	0,13
2	Parallel Screw	8,10	1,56	1,24	1,82	1,59	0,13
3	Upper K wire-Lower Screw	11,35	1,57	1,25	1,84	1,72	0,13
4	Upper Screw-Lower K wire	8,93	1,78	1,20	2,22	1,61	0,14

**Table 7.** Contact pressure of lateral epiphyseal plate (MPa)

No	Fixation Type	Epiphyseal plate					
		Axial	Bending (Varus)	Bending (Valgus)	Bending (Anterior)	Bending (Posterior)	Torsional
1	Parallel K wires	32	2,96	3,07	2,21	5,20	0,10
2	Parallel Screw	8,02	0,10	2,80	1,37	0,62	0,10
3	Upper K wire-Lower Screw	16,19	0,10	2,89	1,37	0,73	0,10
4	Upper Screw-Lower K wire	8,43	0,19	2,85	1,44	0,69	0,08

#### 4. DISCUSSION

The Salter-Harris (SH) classification of growth plate injuries aids in estimating both the prognosis and the potential for growth disturbance [1, 30]. SH type 4 fractures are usually caused by axial loading or shear stress [31]. Intra-articular SH type 4 fractures are rare, carry a poor prognosis, and almost always need surgical reduction to prevent deformity [14]. In the treatment of femur distal epiphysis SH type 4 fractures, parallel screw or K wires between physis and joint can be used [10, 11, 16]. However, there is no biomechanical evidence showing that which one is stronger in fracture stability in fixations done with screw or K wires. In addition, in these fixations, issue about in which technic stress load applied on the physis under force is less or more is still not very clear [17]. In our study, when displacive forces reflected to fracture in physis line evaluated; the lowest stress values in axial forces in longitudinal plan were found by using parallel screw configuration in physis line. When we look at the literature there was no study about the physis after which fixation at which rate it was carrying the stress load [17].

If we think that the worst prognosis of epiphyseal fracture was oppression in physis line, we can think the worst configuration was the most axial stress in physis line [32]. Therefore, the parallel screw configuration has been found to have the best balancing advantages of minimal stress on the physis. The growth interruption may depend on the type of the fracture, or differences material used and also fizeal bar formation was said to be responsible from this conditions [11, 15]. Excessive stress on the physis can support bone formation. In our study, when displacive forces reflected to fracture in physis line evaluated; the highest stress values in axial forces in longitudinal plan were found by using parallel K wire configuration in physis line. In this study, the fixation shape of K wire on the upper and lower configuration was found to be disadvantageous compared to other fixation configurations in the SH type 4 epiphyseal fractures. In another paper by Gok et al [17], they have been found particularly advantageous to use fixation type in screw configuration in SH type 3 epiphyseal fracture. The distal epiphyseal fractures of femur have a high risk of especially growth delay and other morbidities [3-6]. There are some factors considered as the cause of this situation as follows. The age of the person, type of fracture, degree of shear, sinuous structure of physis, quality of fracture reduction process and fixation shape [7-10]. There is no final proof of evidence or biomechanical research that highlight which factors were effective in the formation of iatrogenic epiphysiodesis (bar formation and consequently growth interruption) in this area [17]. In contrast, in many studies growth retards was related to the fracture fixation of this type of fracture [33]. According to our results, it has been found particularly advantageous to use fixation type in parallel screw configuration.

The most important point in the treatment of the bone fractures is the elimination of the stress shielding [34].

The event that implant undertakes to carry the load on the structure, that is, the stresses and deformations occurring in the bone callus structure are reduced and the weakening of the bone is called the stress shielding effect [34-36]. It is suggested that this effect should be kept to a minimum for the healing process not to be delayed. However, in the initial stages of the healing process, bone implant structure is required to be sufficiently strong in contrast to this condition [34].

#### 5. CONCLUSION

In this study, the biomechanical behaviors of four different configurations (K wire, screw) used for stabilization after reduction in SH type 4 epiphyseal fracture of distal femur under axial, rotational and bending forces on epiphyseal plate are investigated, and we tried to find out which of the configurations is more advantageous to use. According to our results, it has been found particularly advantageous to use fixation type in parallel screw configuration. In addition, in SH type 4 epiphyseal fracture, fixation type is found to be disadvantageous in K wire configuration. The contact pressure values occurring in parallel screw configuration is found lower than other configurations for different loading conditions.

#### Conflict of interest

There is no conflict of interest.

#### Funding

There is no funding.

#### REFERENCES

- [1] SALTER RB, HARRIS WR. "Injuries Involving the Epiphyseal Plate", *JBJS*, 45(3): 587-622, (1963)
- [2] Sferopoulos NK. "The Classification of Physeal Injuries", *ARC Journal of Orthopedics* 1(1): 23-7, (2016)
- [3] D.C. Mann , Rajmaira S. "Distribution of physeal and nonphyseal fractures in 2,650 long-bone fractures in children aged 0-16 years", *J Pediatr Orthoped*, 10(6): 713-6, (1990)
- [4] Peterson HA, Madhok R BJ, Ilstrup DM, Melton LJ. "Physeal fractures: Part 1. Epidemiology in Olmsted County, Minnesota, 1979-1988", *J Pediatr Orthoped*, 14(4): 423-30, (1994)
- [5] Basener CJ, Mehlman CT, TG D. "Growth disturbance after distal femoral growth plate fractures in children: a meta-analysis", *J Orthop Trauma*, 23(9): 663-7, (2009)
- [6] Eid AM, Hafez MA. "Traumatic injuries of the distal femoral physis. Retrospective study on 151 cases", *Injury*, 33(3): 251-5, (2002)
- [7] Dahl WJ, Silva S, Vanderhave KL. "Distal Femoral Physeal Fixation: Are Smooth Pins Really Safe?", *J Pediatr Orthoped*, 34(2): 134-8 10.1097/BPO.0000000000000083, (2014)

- [8] Liu RW, Armstrong DG, Levine AD, Gilmore A, Thompson GH, Cooperman DR. "An Anatomic Study of the Distal Femoral Epiphysis", *J Pediatr Orthoped*, 33(7): 743-9 10.1097/BPO.0b013e31829d55bf, (2013)
- [9] Lombardo S, Harvey JJ. "Fractures of the distal femoral epiphyses. Factors influencing prognosis: a review of thirty-four cases", *JBJS*, 59(6): 742-51, (1977)
- [10] Beaty JH, Rockwood CA, Kasser JR. *Rockwood and Wilkins' Fractures in Children*: Wolters Kluwer/Lippincott, Williams & Wilkins, 2010.
- [11] JA. H. Lower extremity injuries. *Tachdjian's Pediatric Orthopaedics*: USA: W.B. Saunders Company, 2002, p. 2327-34.
- [12] Garcés GL, Mugica-Garay I, López-González Coviella N, E G. "Growth-plate modifications after drilling", *J Pediatr Orthop* 14(2): 225-8, (1994)
- [13] Janarv P-M, Wikström B, Hirsch G. "The Influence of Transphyseal Drilling and Tendon Grafting on Bone Growth: An Experimental Study in the Rabbit", *J Pediatr Orthoped*, 18(2): 149-54, (1998)
- [14] Buch BD, Myerson MS. "Salter-Harris type IV epiphyseal fracture of the proximal phalanx of the great toe: a case report", *Foot & ankle international*, 16(4): 216-9, (1995)
- [15] Zionts. LE. Fractures and dislocations about the knee. *Skeletal Trauma in Children*: USA: Saunders, 2003, p. 443-9.
- [16] <http://www.wheelsonline.com/>. 2014.
- [17] Gok K, Inal S, Gok A, Pinar AM. "Biomechanical effects of three different configurations in Salter Harris type 3 distal femoral epiphyseal fractures", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(4): 1069-77, (2017)
- [18] Gok K, Inal S, Gok A, Pinar AM. "Biomechanical effects of three different configurations in Salter Harris type 3 distal femoral epiphyseal fractures", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 1-9, (2016)
- [19] Gok K. "Development of three-dimensional finite element model to calculate the turning processing parameters in turning operations", *Measurement*, 75(57-68), (2015)
- [20] Inal S, Taspınar F, Gulbandilar E, Gok K. "Comparison of the biomechanical effects of pertrochanteric fixator and dynamic hip screw on an intertrochanteric femoral fracture using the finite element method", *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 11(1): 95-103, (2015)
- [21] ERDEM M, GOK K, GOKCE B, GOK A. "NUMERICAL ANALYSIS OF TEMPERATURE, SCREWING MOMENT AND THRUST FORCE USING FINITE ELEMENT METHOD IN BONE SCREWING PROCESS", *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 1750016, (2016)
- [22] Gok A, Inal S, Taspınar F, Gulbandilar E, Gok K. "Fatigue behaviors of different materials for schanz screws in femoral fracture model using finite element analysis", *Optoelectroin and Adv Mater Rapid Commun*, 8(5-6): 576-80, (2014)
- [23] Afsar E, Taspınar F, Calik BB, Ozkan Y, Gok K. "Use of the finite element analysis to determine stresses in the knee joints of osteoarthritis patients with different Q angles", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 1-7, (2016)
- [24] Gok K, Taspınar F, Inal S, Gulbandilar E. "IMPORTANCE OF SIDEBAR-BONE SPACING DURING THE APPLICATION OF PERTROCHANTERIC FIXATOR ON FEMORAL INTERTROCHANTERIC FRACTURE MODEL; COMPARISON OF THE BIOMECHANICAL EFFECTS USING FINITE ELEMENT METHOD", *Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications*, 27(03): 1550030, (2015)
- [25] Goffin JM, Pankaj P, Simpson AH. "The importance of lag screw position for the stabilization of trochanteric fractures with a sliding hip screw: A subject-specific finite element study", *J Orthopaed Res*, 31(4): 596-600, (2013)
- [26] Atmaca H, Kesemenli C, Memişoğlu K, Özkan A, Celik Y. "Changes in the loading of tibial articular cartilage following medial meniscectomy: a finite element analysis study", *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 21(12): 2667-73, (2013)
- [27] AnsysWorkbench. Material Library. 2014.
- [28] Yuan-Kun T, Yau-Chia L, Wen-Jen Y, et al. Temperature Rise Simulation During a Kirschner Pin Drilling in Bone. *Bioinformatics and Biomedical Engineering*, 2009 ICBBE 2009 3rd International Conference on. Beijing 2009, p. 1-4.
- [29] Peña E, Calvo B, Martínez MA, Palanca D, Doblare M. "Finite element analysis of the effect of meniscal tears and meniscectomies on human knee biomechanics", *Clin Biomech*, 20(5): 498-507, (2005)
- [30] Brown JH, DeLuca SA. "Growth plate injuries: Salter-Harris classification.", *American Family Physician* 46(4): 1180-4, (1992)
- [31] Eifff MP, Hatch R, Calmbach WL. *Fracture Management for Primary Care*: Saunders, 1998.
- [32] SEYHAN F, GÖKSAN SB. Çocuk Kırıkları. *Ortopedik Travmatoloji*: Nobel Tıp Kitabevleri 89-101, (2002).
- [33] Wall EJ, May MM. "Growth plate fractures of the distal femur", *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 32(S40-S6), (2012)
- [34] Çelik A, Kovacı H, Saka G, Kaymaz İ. "Numerical investigation of mechanical effects caused by various fixation positions on a new radius intramedullary nail", *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 18(3): 316-24, (2015)
- [35] Kujala S, Ryhänen J, Jämsä T, et al. "Bone modeling controlled by a nickel-titanium shape memory alloy intramedullary nail", *Biomaterials*, 23(12): 2535-43, (2002)
- [36] Cheung G, Zalzal P, Bhandari M, Spelt JK, Papini M. "Finite element analysis of a femoral retrograde intramedullary nail subject to gait loading", *Medical Engineering & Physics*, 26(2): 93-108, (2004)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN:1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# The effect of process parameters on microstructure and porosity of layered NiAl(Co/Cr) alloy produced by SHS method

*SHS yöntemiyle üretilen tabakalı NiAl(Co/Cr) alaşımının mikroyapı ve gözenek oranına işlem parametrelerinin etkisi*

*Yazar(lar)(Author(s)): İbrahim BİLİZ<sup>1</sup>, Adem BAKKALOĞLU<sup>2</sup>, Musa KILIÇ<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-9090-4905*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-7148-2567*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0001-5808-6917*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to thi sarticle):** Biliz İ., Bakkaloglu A., Kilic M., "The effect of process parameters on microstructure and porosity of layered NiAl(Co/Cr) alloy produced by SHS method", *Politeknik Dergisi*, 23(1): 161-169, (2020).

**Erişim linki(To link to this article):**<http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.557592



# SHS Yöntemiyle Üretilen Tabakalı NiAl(Co/Cr) Alaşımının Mikroyapı ve Gözenek Oranına İşlem Parametrelerinin Etkisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**İbrahim BİLİZ<sup>1\*</sup>, Adem BAKKALOĞLU<sup>2</sup>, Musa KILIÇ<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Faculty of Engineering and Architecture, Metallurgical and Materials Eng. Dpt., Batman University, Turkey

<sup>2</sup>Faculty of Chemistry-Metallurgy, Metallurgical and Materials Eng. Dpt., Yıldız Technical University, Turkey

<sup>3</sup>Faculty of Technology, Machinery and Manufacturing Engineering Dpt., Batman University, Turkey

(Geliş/Received : 24.04.2019; Kabul/Accepted : 20.05.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada SHS yöntemiyle üretilmiş olan tabakalı NiAl(Co/Cr)alaşımının mikroyapı ve gözenek oranına sıkıştırma basıncı, ön ısıtma ve alaşımlamanın etkisi incelendi. % 50 Ni-%50 Al tozlarına her tabakaya %3, %6 ve %10 Co ve Cr tozları ilave edilerek 300 dev/dk hızında 12 saat süreyle döner bir kap içerisinde karıştırıldı. Karıştırılan tozlar bir kalıp içerisinde soğuk presle 50,100 ve 200 MPa basınçla briketlendi. Elde edilen ham numuneler daha sonra argon atmosfer kontrolündeki bir odacığa alınarak ön ısıtmasız ve 250 °C ön ısıtmalı olarak ateşlenerek sentezlendi. Yanma reaksiyonu ile sentezlenen numunelerin mikroyapıları, elementel analizi ve faz analizi SEM-BSE, EDS ve XRD cihazlarıyla incelendi. EDS analizi sonucunda en yüksek değerde Ni elementinin olduğu, bunu takiben Al ve alaşıma göre Co ve Cr olduğu belirlendi. Faz bileşenlerini belirlemek için yapılan XRD analizinde ise en yüksek pik değerlerin NiAl olduğu, düşük değerdeki piklerin Ni<sub>3</sub>Al ve NiAl<sub>3</sub> olduğu tespit edildi. Yapılan yoğunluk hesaplamaları sonucunda gözenek oranını etkileyen en önemli parametrenin sıkıştırma basıncının olduğu, bunun temel nedeninin basıncının artmasıyla tozların birbirine temasının artması sonucunda yanma reaksiyonunun kesilmeden ilerlemesi, ergimiş tozların yer değiştirme fırsatı olmadan katılaştırmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. En yüksek gözenek değerleri ön ısıtmasız 50 MPa basınçta sahip numunelerde olduğu belirlendi.

**Keywords:** NiAl, NiAlCoCr, nikel alüminat, SHS, gözeneklilik.

## The Effect of Process Parameters on Microstructure and Porosity of Layered NiAl(Co/Cr) Alloy Produced by SHS Method

### ABSTRACT

This paper deals with the investigation of microstructure and porosity of layered compounds of NiAl(Co/Cr) powders by SHS method. Layers of 50% Ni-50% Al powders were mixed with 3%, 6% and 10% of Co and Cr powders. These were mixed for 12 hours in a rotational container with a speed of 300 rpm. Mixed powders were cold compressed in a mould with pressures of 50, 100 and 200 MPa. The obtained samples were then synthesized in an argon controlled atmosphere with and without preheating to 250 °C. The microstructure of synthesized samples was analysed using SEM-BSE, EDS and XRD. The EDS results showed that the samples were containing Ni in majority along with Al, Co, and Cr. To determine the phase components, XRD spectra was analysed and the peaks of NiAl, Ni<sub>3</sub>Al, and NiAl<sub>3</sub> were confirmed with NiAl having the highest peak intensity. The density calculations showed that the ratio of pores was affected the most from pressure. The main reason for this was attributed to the better contact of the powders under higher pressure which helped an uninterrupted reaction. The highest pore ratio values were obtained from samples produced under 50 MPa pressure.

**Keywords:** NiAl, NiAlCoCr, nickel aluminide, SHS, porosity.

### 1. INTRODUCTION

Intermetallic compounds are promising materials due to their high temperature oxidation resistance, excellent thermal stresses and low density [1]. Due to their

resistance to elevated temperatures and aggressive environments, FeAl, Fe<sub>3</sub>Al, NiAl and Ni<sub>3</sub>Al are promising materials among intermetallic aluminides [2]. In the binary phase NiAl diagram, intermetallic compounds of NiAl<sub>3</sub>, Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, Ni<sub>5</sub>Al<sub>3</sub>, NiAl, and Ni<sub>3</sub>Al are present. Of these intermetallic compounds, NiAl and Ni<sub>3</sub>Al are the most stable structures of the system [3, 4].

\*sorumlu yazar (Corresponding Author)  
e-mail : ibrahim.biliz@batman.edu.tr

The production of intermetallic compounds can be performed by powder metallurgy methods, casting and conventional melting processes. On the other hand, the SHS (self propagating high-temperature synthesis) method is one of the powder metallurgy methods that is fast and does not require expensive equipment. There is no need for external heating since the synthesis is performed by self-propagation. This method allows the formation of desired shapes quite successfully [5].

Combustion synthesis, or reaction synthesis, is a method that helps obtaining a desired product in a short time. In other words an exothermic reaction occurs in the first instance of providing enough energy to the raw metal powders. Compared to conventional powder metallurgy methods, SHS method requires less time along with being a cheaper, cleaner and easier process. In the SHS process, the sample is ignited to create a burning wave. This combustion reaction produces exothermic heat, allowing the combustion wave to propagate through the sample [4, 6, 7]. However, the microstructure of materials produced by reaction synthesis contains a significant number of pores. Formation of gases due to impurities that have low boiling points and the expansion

of NiAl-Ni<sub>3</sub>Al phases at high temperatures leads to pore formation. In case of severe reactions, an explosion can also be observed in the briquette. If the product melts at the combustion temperature as in NiAl, the porosity induced by the solidification shrinkage may occur [4].

The main problem in intermetallic research is that the compounds such as NiAl are brittle, which introduces restriction in shaping. [8]. Therefore, finding a solution to those limitations is an important part of this research field. However, in this study rather than focusing on finding a solution to aforementioned problem, the porosity ratio was investigated since this parameter affects mechanical and thermal properties of the formed material [8, 9].

The manufacturability of NiAl alloy was investigated by adding 3%, 6% and 10% layers of Cr which is stated to increase toughness and ductility and Co which is stated to increase the hardness and porosity of the samples according to the changing parameters [8, 9, 10, 11, 12]. Also, SEM-BSE and optical microscopy were used to determine the microstructure. Elemental analysis and phase analysis were performed by EDS and XRD

**Table 1.** Physical properties of metal powders used in the experiments

Materials	Purity (%)	Powder Size (mesh)	Melting Temperature (°C)	Specific weight (gr/cm <sup>3</sup> )
Aluminium	99.99	325	660	2.700
Nickel	99.99	325	1453	8.908
Cobalt	99.99	325	1495	8.920
Chromium	99.99	325	1875	7.190

**Table 2.** Atomic and mass ratios with theoretical densities of mixtures of metal powders

Powder Metal Mixture	Atomic Ratio	Mass Ratio	Theoretical Densities
NiAl	50% Ni, 50% Al	76.74% Ni, 23.26% Al	5.804
NiAlCo(3%)	48.5% Ni, 48.5% Al, 3% Co	73.26% Ni, %22.21 Al, 4.53% Co	5.848
NiAlCr(3%)	48.5% Ni, 48.5% Al, 3% Cr	73.91% Ni, 22.40% Al, 3.69% Cr	5.846
NiAlCrCo(1.5% -1.5%)	48.5% Ni, 48.5% Al, 1.5% Co, 1.5% Cr	73.58% Ni, 22.30% Al, 2.27% Co, 1.84% Cr	5.872
NiAlCo(6%)	47% Ni, 47% Al, 6% Co	69.90% Ni, 21.18% Al, 8.92% Co	5.990
NiAlCr(6%)	47% Ni, 47% Al, 6% Cr	71.12% Ni, 21.55% Al, 7.33% Cr	5.890
NiAlCrCo(3%-3%)	47% Ni, 47% Al, 3% Co, 3% Cr	70.53% Ni, 21.38% Al, 4.49% Co, 3.63% Cr	5.940
NiAlCo(10%)	45% Ni, 45% Al, 10% Co	65.56% Ni, 19.88% Al, 14.56% Co	6.110
NiAlCr(10%)	45% Ni, 45% Al, 10% Cr	67.45% Ni, 20.45% Al, 12.10% Cr	5.940
NiAlCrCo(5%-5%)	45% Ni, 45% Al, 5% Co, 5% Cr	66.49% Ni, 20.15% Al, 7.38% Co, 5.96% Cr	6.030

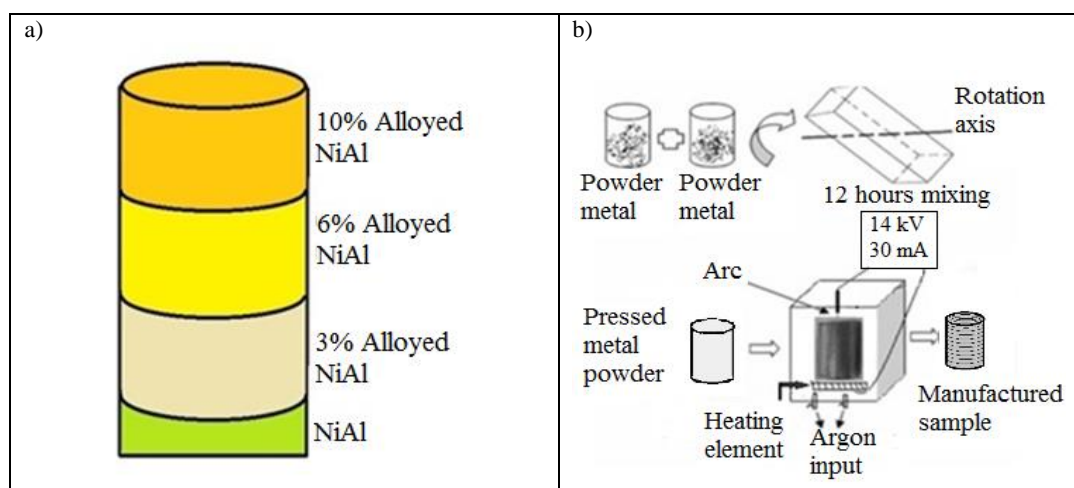
## 2. MATERIALS AND METHODS

Metal powders of Ni, Al, Co and Cr used in this study were purchased from a commercial supplier. Each stage of the experiment was carried out in the Argon atmosphere. The first sample was prepared using atomic ratios of 50% Ni and 50% Al. 3%, 6% and 10% of Co and Cr were added to prepared Ni-Al mixture. Table 1 provides information on these metal powders.

Metal powder combinations were mixed for 12 hours at 300 rpm in a mixer [13]. Calculations of the atomic and mass ratios and theoretical density of mixtures of Ni, Al, Co and Cr metal powders are given in Table 2.

The powder mixtures obtained at the end of this process are compressed into a cylindrical mold using cold press at 50 MPa, 100 MPa and 200 MPa. Mixture densities were calculated and taken into account in order to obtain the same volume of layers. The porosity of the porous samples calculated with equation [14]:

$$f = 1 - \frac{m}{d \cdot v} \quad (1)$$



**Figure 1.** a) Schematic view of raw samples, b) Sample production process diagram

where  $f$  stands for pore percentage,  $m$  is sample weight,  $d$  is theoretical density of the sample and  $v$  is porous sample volume. The theoretical density of the porous samples calculated by equation [14]:

$$d_t = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{v_1 + v_2 + \dots + v_n} \quad (2)$$

where  $d$  is density  $v$  is volume. The ratio of porous samples (weight percentage ratio) calculated by equation [14]:

$$\begin{aligned} RPW_1\% &= \\ &= \frac{d_1 \cdot ARP_1}{d_1 \cdot ARP_1 + d_2 \cdot ARP_2 + \dots + d_n \cdot ARP_n} \quad (3) \\ &* 100 \end{aligned}$$

In the latter equation  $RPW\%$  stands for percentage ratio of weight and  $ARP$  is described as atomic ratio percentage. Figure 1 (b) shows the schematic view of raw samples made from 3%, 6% and 10% alloy admixtures in NiAl alloy layers along with the process diagram to achieve it.

An ignition unit was designed to be used for ignition and pre-heating of the pressed samples in the argon atmosphere. This ignition unit consists of preheating chamber, ignition center and reservoir, along with temperature control knob and argon gas inlet-outlet sections. The SHS based production method is depicted in Figure 1 (b) [15]. Samples were classified into two groups. The first group was treated with preheating to 250° C. The other group was not preheated.

The compacted samples were fired in the synthesis chamber with external heat under an argon atmosphere. The theoretical density of the mixtures and the density of the raw samples were obtained. Then, these values were compared to the density of the samples after the synthesis. The porosity to volume ratios of the synthesized samples were determined by weight and size measurements as the samples had regular geometries.

Samples were cut on the cutting disc for metallographic analysis after synthesis. The cut samples were polished using 240, 400, 600, 800, 1000 and 1200 mesh abrasives. After this process, the samples were polished with polishing broadcloth using a 1  $\mu$ m diamond paste solution for final polishing. 33% HF, 33% HNO<sub>3</sub>, 33% water solution was used for 15 seconds to perform microstructure analysis of the polished samples [13]. For the microstructure analysis of samples after etching, a Leica optical microscope and a Jeol JSM-5410LV brand SEM-BSE device were used. The elemental analysis of the samples was performed by a Jeol JSM-5410LV EDS device and the phase components were detected with a Rigaku brand XRD device.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, different samples were obtained by changing the compression pressure, preheating temperature and reinforcement ratios, which were selected as variables in the process parameters. The porosity of these samples is given in Table 3. The graphs of these values are shown in Figure 2.

As the compression ratio increases, the contact of the powder particles to each other increases and the porosity decreases (14). In addition, the increase in contact is

On the other hand, preheating at 250 °C before the synthesis increased the porosity. It is thought that the expansion due to the heat energy given in the raw state increases the porosity due to the fact that the samples do not have time to shrink, together with the rapid rate of the synthesis reaction. Co and Cr additions with different ratios have been determined to increase the porosity in different ratios. However, the Cr addition alone decreased the porosity while the Co addition increased the porosity. This supports the data in the literature [12,

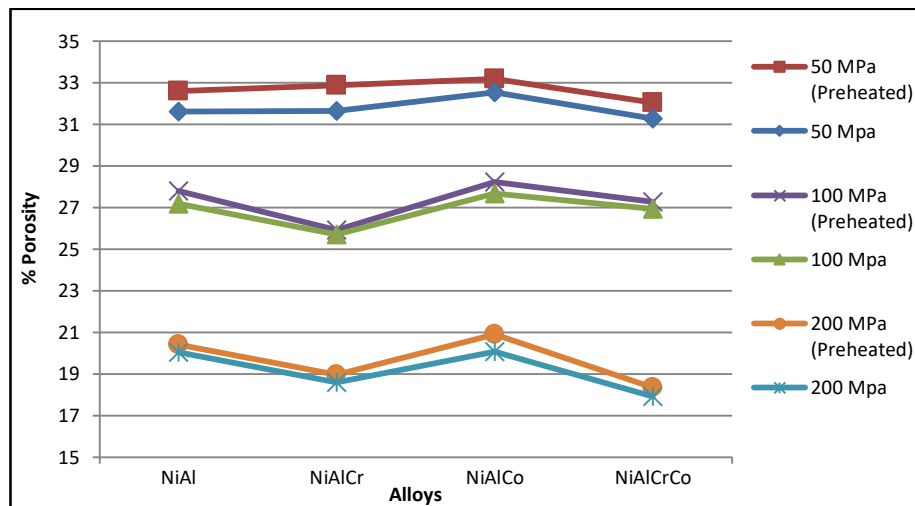


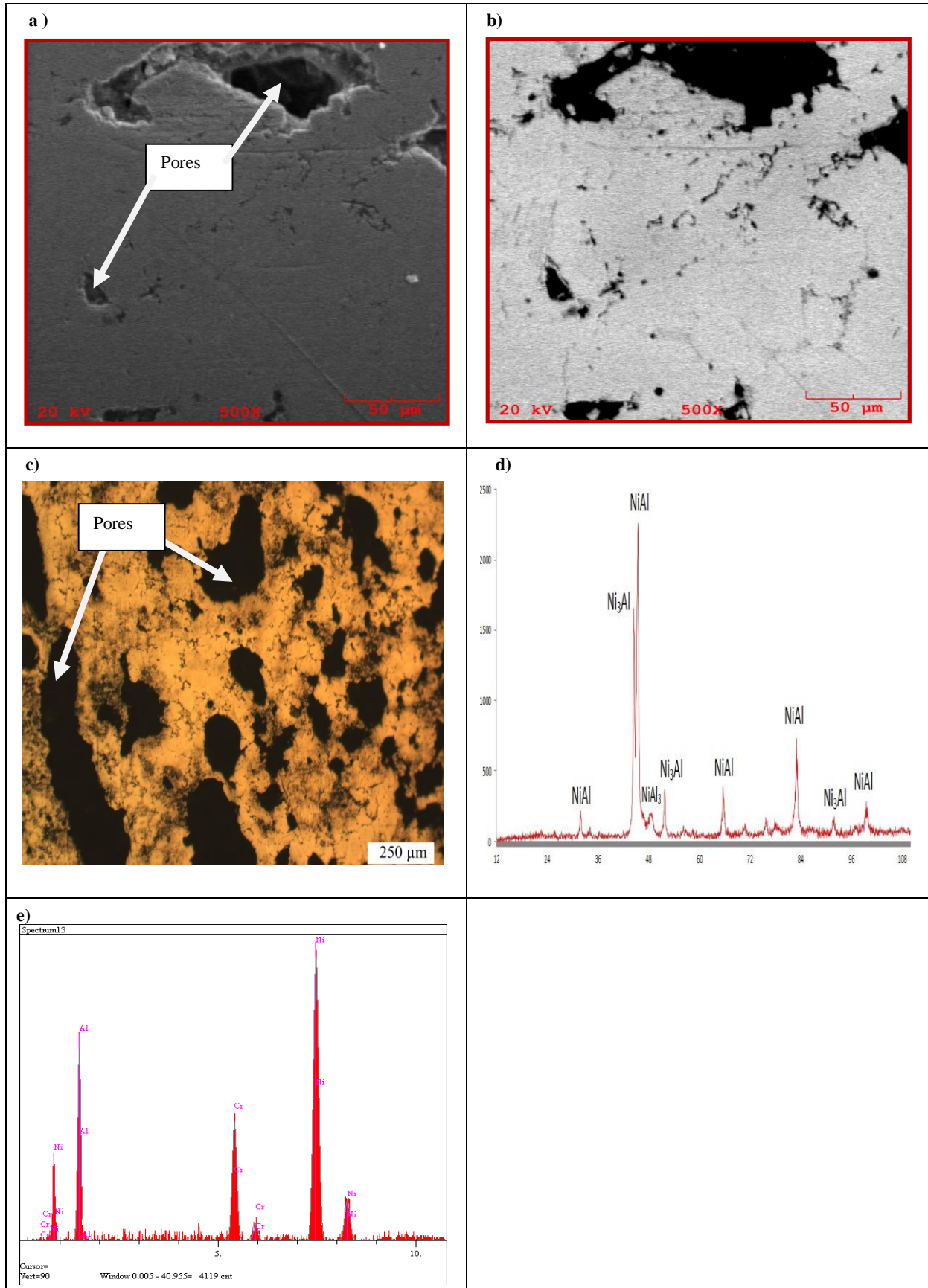
Figure 2. Pore ratios of the samples

thought to prevent the formation of pores by allowing the raw powders to burn without falling into the cavities during synthesis.

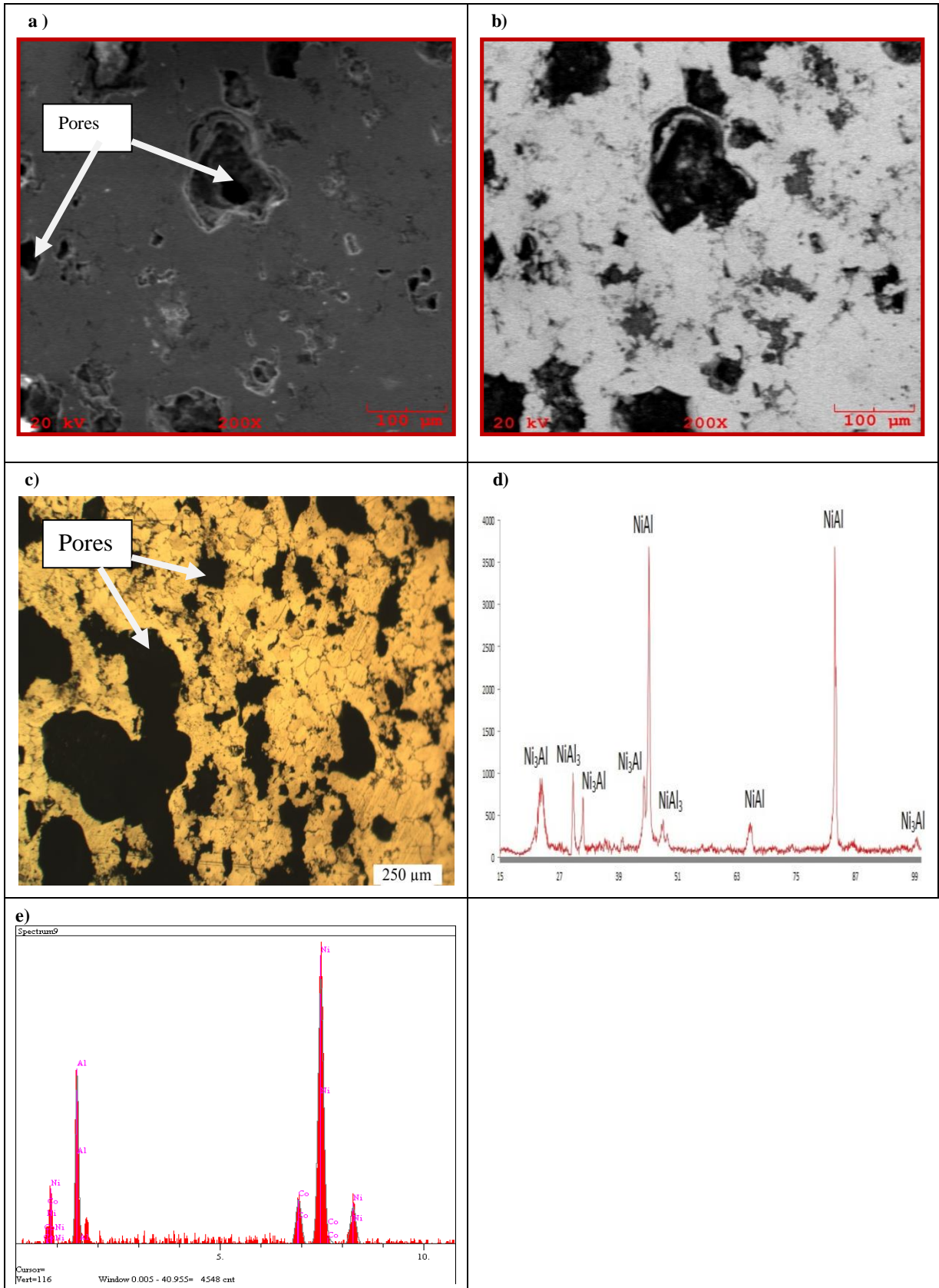
16, 17]. The SEM-BSE images, the optical microscope images and the XRD of the NiAlCo alloy are shown in Figure 3, of the NiAlCr alloy are shown in Figure 4 and of the NiAlCrCo alloy in Figure 5 and the EDS measurements shown in Table 4.

Table 3. Pore ratios of samples

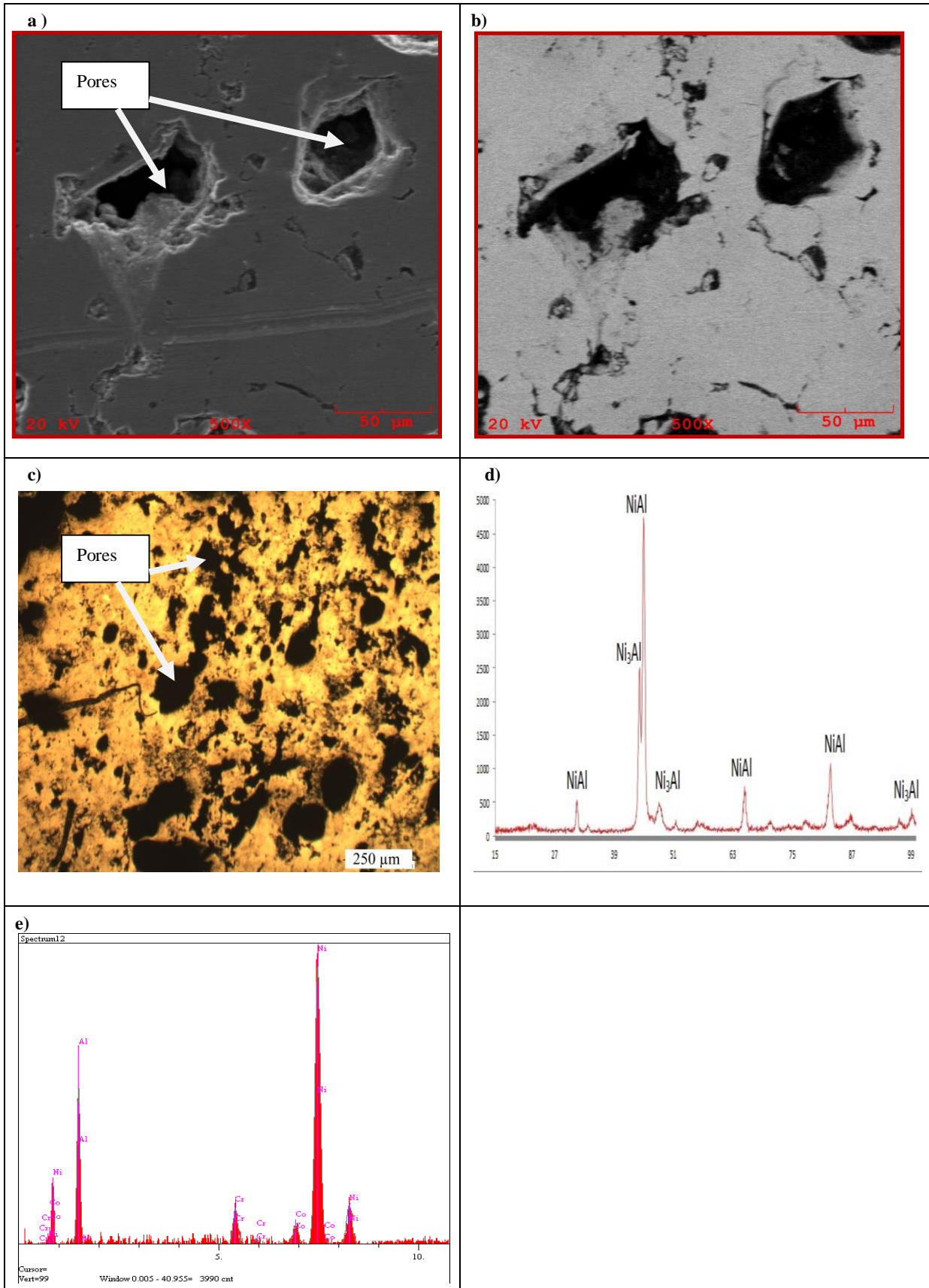
	Pressure (MPa)	Pore Ratio	
		Without Preheating (23 °C)	Pre-heated (250 °C)
NiAlCr	50	31.64	32.87
	100	25.69	25.92
	200	18.60	18.97
NiAlCo	50	32.53	33.19
	100	27.69	28.23
	200	20.06	20.90
NiAlCrCo	50	31.29	32.04
	100	26.95	27.28
	200	17.90	18.35
NiAl	50	31.63	32.60
	100	27.17	27.81
	200	20.03	20.40



**Figure 3.** a) SEM, b) BSE and c) Optical microscope images, d) XRD and e) EDS measurements of NiAlCr alloy



**Figure 4.** a) SEM, b) BSE and c) Optical microscope images, d) XRD and e) EDS measurements of NiAlCo alloy



**Figure 5.** a) SEM, b) BSE and c) Optical microscope images, d) XRD and e) EDS measurements of NiAlCrCo alloy

**Table 4 .** EDS analysis of NiAlCr, NiAlCo and NiAlCoCr alloys

Element	Intensity						Concentration wt. %		
	NiAlCr		NiAlCo		NiAlCoCr		NiAlCr	NiAlCo	NiAlCoCr
	(c/s)	2-sig	(c/s)	2-sig	(c/s)	2-sig			
Al	18.72	1.580	21.1	1.677	17.00	1.505	16.891	15.141	13.771
Cr	16.98	1.505	-	-	5.69	0.871	10.686	-	4.011
Co	-	-	8.88	1.088	3.32	0.694	-	9.942	4.571
Ni	46.26	2.483	55.49	2.720	50.90	2.605	72.423	74.917	77.648

Raw porosity, pre-heating temperature, gas formation during the reaction, thermal migration, volume reduction of the reactants and the difference in diffusion between the elements are effective in the formation of pores. Part of the gas is trapped due to increasing external pressure while part of the gas is leaving the sample. In addition, shrinkage occurs when the alloy is formed. During shrinkage, the gas may leak and be trapped in the sample. The samples consist of closed pores and small chambers after this process. When the shrinkage is not fully closed, the chambers open to each other or to the canals by narrow passages. Thus, small open pores are formed. The shapes of the pores can be in different forms. As can be seen from SEM images of porous NiAl with 30% and 14% Al content sintered at 1000 °C from a previous study[17], pore size of NiAl alloys is generally greater than Ni<sub>3</sub>Al pore size. And it has been reported in the studies that Al content has a great effect on the pore structure of aluminate intermetallic. They also stated that the total pore ratio of NiAl (50%) was greater than Ni<sub>3</sub>Al's(30%) as a result of the measurements made by Archimedes method in water.

Figure 2, Figure 3 and Figure 4 shows SEM and optical microscope images taken in this study. The formation of large and small pores can be determined from those images. This is attributed to the escape of the gases that trapped between powders during the combustion reaction. Also, low compacting values can lead to formation of such structures [3]. In the EDS elemental analysis taken from the 10% Co addition sample, 74.917% Ni, 15.141% Al and 9.942% Co were determined and from the 10% Cr addition sample, 72.4% Ni, 16.9% Al and 10.7% Cr were detected. In the EDS elemental analysis taken from 5% Co and 5% Cr added samples, 77.6% Ni, 13.8% Al, 4.5% Co and 4% Cr were determined. According to these EDS data, it can be said that metal powders are homogeneously distributed within the structure. In the XRD analysis of the same samples, the highest NiAl and Ni<sub>3</sub>Al phases and a low ratio of NiAl<sub>3</sub> phase determined in NiAl-Cr alloy, the highest NiAl and a low ratio of Ni<sub>3</sub>Al and NiAl<sub>3</sub> phases determined in NiAl-Co alloy, and the highest NiAl and low ratio of Ni<sub>3</sub>Al in NiAl-CoCr alloy.

#### 4. CONCLUSIONS

In this study, the manufacturability and the porosity ratio of NiAl alloy was investigated by adding 3%, 6% and 10% of both Cr and Co layers. Layered NiAl (Co / Cr) intermetallic compound was successfully produced with SHS method by using different combinations of process parameters such as pressure and preheating. SEM, EDS and XRD analysis were performed and the porosity ratios were examined. The following characteristics of samples were observed;

1. As expected, the porosity in each of three separate samples decreased with increasing pressure.
2. The porosity of the preheated samples partially increased.
3. Adding Co relatively increased the porosity while adding Cr decreased it. In the case where these two elements were added together, the pore ratio increased near the average.
4. The addition of Co had a reducing effect on the secondary phase formation alongside NiAl.
5. The addition of Cr provokes the formation of Ni<sub>3</sub>Al phase along with NiAl phase.
6. According to density calculations, it can be seen that the compression pressure is the most effective parameter that changes the porosity. The main reason for this is thought to be the increase in contact points of powders with increasing pressure resulting in an uninterrupted combustion reaction. Therefore, the molten powders solidify without the possibility of displacement.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by Yıldız Technical University Scientific Research Projects Unit coded as FYL-2018-3354. We thank Yıldız Technical University Scientific Research Projects Unit for their support.



## REFERENCES

- [1] Li, Y., Liu, Y., Geng, H., Nie, D., "Synthesis and cladding of Ni<sub>3</sub>Al intermetallic on steel substrate by laser controlled reactive synthesis", *Journal of Materials Processing Technology*, 171: 405–410, (2006).
- [2] Wang Y., Chen W, "Microstructures, properties and high-temperature carburization resistances of HVOF thermal sprayed NiAl intermetallic-based alloy coatings", *Surface and Coatings Technology*, 183: 18–28, (2004).
- [3] Brammer M.T., "Improving the phase stability and oxidation resistance of  $\beta$ -NiAl", *MSc Thesis*, Iowa State University, Ames, Iowa, (2011).
- [4] K. Morsi, "Review: reaction synthesis processing of Ni–Al intermetallic materials", *Materials Science and Engineering*, A299: 1–15 (2001).
- [5] Dey G. K., "Physical metallurgy of nickel aluminides", *Sadhana*, 28, (Parts 1 & 2): 247–262, (2003).
- [6] La, P., Bai, M., Xue, Q., Liu, W., "A study of Ni<sub>3</sub>Al coating on carbon steel surface via the SHS casting route", *Surface and Coatings Technology*, 113: 44–5, (1999).
- [7] Kılıç, M., "The investigation of microstructures and fabrication of functionally graded intermetallic materials by self-propagating high-temperature synthesis", *Batman University Journal of Life Sciences*, 5: 87-98 (2015).
- [8] Ulu R., "Effect of Alloying elements on the microstructure and mechanical properties of NiAl alloys", *M.Sc. Thesis*, Karabuk University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Karabuk (2013).
- [9] Yong C., Peixian Z., Jingchuan Z., Yong L., "First-principles study of NiAl alloyed with Co", *Computational Materials Science*, 111: 34–40 (2016).
- [10] Kiyotakai M., Khan T. İ., Ohmi T., Kudoh M, "Reactive casting of B2 Ni-Al-Co ternary intermetallic alloys", *Materials Transactions*, 42(2): 263-268 (2001) .
- [11] Cotton J.D., "The influence of chromium on structure and mechanical properties of B2 Nickel aluminide alloys", *PhD Thesis*, University of Florida, 1(991).
- [12] Chen L, Han Y., "The microstructure and compressive properties in NiAl(Co) alloys by HPXD technique", *Materials Science and Engineering* A329–331 725–728, (2002).
- [13] Kılıç, M., "Investigation of production of NiTi and Ni<sub>3</sub>Al functionally graded material by reaction synthesis method", *PhD Thesis*, Firat University Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Metal Education, (2014).
- [14] Tosun G., Özler L., Kaya M., Orhan N., "Investigation of porosity of NiTi alloys produced by shs method", *5th International Powder Metallurgy Conference*, Ankara, 1353-1367, (2008).
- [15] Kaya, M., "Investigation of metallurgical and mechanical characteristics of NiTi shape memory alloys produced by powder metallurgy", *PhD Thesis*, Firat University Graduate School of Natural and Applied Sciences, (2008).
- [16] Kovalev A.I., Barskayab R.A., Wainstein D.L., "Effect of alloying on electronic structure, strength and ductility characteristics of nickel aluminide", *Surface Science*, 532 35–40, (2003).
- [17] Dong H.X., Jiang Y., He Y.H., Zou J., Xu N.P., Huang B.Y., Liu C.T., Liaw P.K., "Oxidation behavior of porous NiAl prepared through reactive synthesis", *Materials Chemistry and Physics*, 122: 417–423, (2010).
- [18] Dong, H.X., Jiang, Y., He, Y.H., Song, M., Zou, J., Xu, N.P., Huang, B.Y., Liu, C.T., Liaw, P.K., "Formation of porous Ni–Al intermetallics through pressureless reaction synthesis", *Journal of Alloys and Compounds*, 484: 907–913, (2009).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



**İnsan kolon kanseri hücrelerine karşı inorganik nanopartikül-temelli ilaç taşıyıcı sistemlerin kullanılması: partikül büyüklüğünün antikanser aktivitesine etkisi**

*Using inorganic nanoparticle-based drug delivery systems against human colon cancer cells: effect of particle size on anticancer activity*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Cenk DAĞLIOĞLU

*ORCID:* 0000-0002-3857-2317

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Dağlıoğlu C., “İnsan kolon kanseri hücrelerine karşı inorganik nanopartikül-temelli ilaç taşıyıcı sistemlerin kullanılması: partikül büyüklüğünün antikanser aktivitesine etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 171-179, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.496351

# İnsan Kolon Kanseri Hücrelerine Karşı İnorganik Nanopartikül-Temelli İlaç Taşıyıcı Sistemlerin Kullanılması: Partikül Büyüklüğünün Antikanser Aktivitesine Etkisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Cenk DAĞLIOĞLU\*

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Urla/İzmir 35430, Türkiye  
(Geliş/Received : 12.12.2018 ; Kabul/Accepted : 11.03.2019)

## ÖZ

Günümüz nanopartikül teknolojisi, özellikle kanser nanotıp uygulamalarında kullanılmak üzere istenilen boyut, şekil ve malzemeye sahip nanopartikül-temelli ilaç taşıyıcı sistemlerinin sentezine olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla, partikül boyutlarının antikanser aktivite üzerindeki etkisini anlamak, kanser tedavisinde yeni ilaç taşıyıcı sistemlerin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır. Bu nedenle, bu çalışmada, ilaç taşıyıcı sistemler olarak iki farklı büyüklükteki inorganik temelli nanopartiküller (~ 55 ve 314 nm) kullanıldı ve boyutlarının hücresel birikim, sitotoksisite ve apoptoz üzerindeki etkileri insan kolon kanseri Caco-2 ve HCT-116 hücrelerine karşı araştırıldı. Elde edilen sonuçlar, büyük nanopartiküllerle karşılaştırıldığında küçük nanopartiküllerin her iki kanser hücresinde de hızlı nanopartikül birikimini desteklediğini gösterdi. Küçük nanopartiküller, büyük nanopartiküllere göre 48 saat içinde daha düşük yarı-maksimum inhibisyon konsantrasyonu ( $IC_{50}$ ) değerleri ile kanser hücrelerinde daha yüksek sitotoksisite sergiledi. Öte yandan, her iki nanopartikül de 72 saate varan inkübasyon süreleri sonrası benzer  $IC_{50}$  değerleri gösterdi. Ayrıca, küçük nanopartiküller 24 saatte apoptotik hücrelerin sayısını artırırken, büyük nanopartiküllerin 72 saatlik süre içerisinde apoptozu indüklediği belirlendi. Bu gözlemler, küçük boyutlu ilaç taşıma sistemlerinin, büyük boyutlu ilaç taşıma sistemleri ile karşılaştırıldığında, insan kolon kanseri hücrelerinde kemoterapötik ilaçların antikanser etkilerini artırmada daha verimli olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** İlaç taşıma sistemleri, partikül boyutu, kolon kanseri, Caco-2 hücreleri, HCT-116 hücreleri.

## Using Inorganic Nanoparticle-Based Drug Delivery Systems against Human Colon Cancer Cells: Effect of Particle Size on Anticancer Activity

### ABSTRACT

Today's nanoparticle technology enables the synthesis of nanoparticle-based drug delivery systems with desired size, shape, and materials especially for the applications of cancer nanomedicine. Thereby, understanding impact of particle sizes on anticancer activity will contribute to development of new drug delivery systems in cancer therapy. For this reason, in this study, two different sized nanoparticles (with ~55 and 314 nm) were used as drug delivery systems and the effects of their size on the cellular uptake, cytotoxicity and apoptosis were investigated against the human colon carcinoma Caco-2 and HCT-116 cells. The results demonstrated that small nanoparticles promoted fast nanoparticle accumulation in both cancer cells in comparison to large particles. Small nanoparticles exhibited higher cytotoxicity in cancer cells with lower half maximal inhibitory concentration ( $IC_{50}$ ) values than large nanoparticles in 48 h. On the other hand, both nanoparticles showed similar  $IC_{50}$  values after 72 h prolonged exposure. Moreover, it was found that small nanoparticles increased the number of apoptotic cells in 24 h, whereas large nanoparticles induced apoptosis when exposure time increased to 72 h. These observations show that small sized drug delivery systems could be more efficient for improving the anticancer effects of chemotherapeutic drugs against human colon carcinoma as compared to large sized drug delivery systems.

**Keywords:** Drug delivery systems, particle size, colon cancer, Caco-2 cells, HCT-116 cells.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son zamanlarda ilaç taşıyıcı sistemler; tümör belgelerini hedefleyebilme, düşük çözünürlüğe sahip antikanser ilaçların biyoyararlanımlarını artırma, sistemik toksisiteyi engelleme ve çoklu ilaç dirençliliğini elimine etme

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : cenkdaglioglu@iyte.edu.tr

gibi özellikleri sayesinde kanser araştırmalarında çok fazla çalışmada ön plana çıkmıştır [1-5]. Günümüze kadar geliştirilen çok sayıdaki ilaç taşıyıcı sistemleri arasında, manyetik özelliğe sahip inorganik-temelli nanopartiküller aynı anda hem diyagnostik hem de terapötik uygulamalarda kullanılabilirliği açısından umit vericidir. Bu partiküllerin, sentezlerinin kolaylığı ve

çeşitli hücre-spesifik hedefleme, görüntüleme ve terapötik fonksiyonların sisteme kolayca entegre edilebilmesinden dolayı akıllı nano ilaç taşıyıcılar olarak kullanılmaları mümkün hale gelmiştir [6-7]. Son zamanlarda taşıyıcı sistemlerin boyutlarının intratümör birikime ve antikanser aktiviteye etkisine odaklanan çok sayıda çalışma mevcuttur [8]. Çünkü tümörlü bölgelerde oluşan anormal biyo-bariyerlerin üstesinden gelmek için, sentezlenen nanopartikül boyutlarının karakterizasyonu, taşıyıcı sistemlerin antikanser etkinliğini anlama ve kapasitelerini geliştirme açısından çok büyük öneme sahiptir. Nanopartiküllerin boyutu hücre zarına bağlanma kabiliyetlerini belirlerken, ayrıca taşıyıcı sistemlerin yüzeyleri kanser hücreleri tarafından aşırı ifade edilen reseptörlere spesifik ligandlarla modifiye edilerek aktif olarak hücrelerle nanopartiküller arasındaki etkileşim oranları artırılabilir [9]. Bu sayede, nanopartiküller aracılığıyla kanser hücrelerinin içindeki ilaç konsantrasyonları artırılırken, antikanser ilaçların normal hücrelere karşı oluşturabileceği sistemik toksisite de minimize edilmektedir.

Vücudun koruma mekanizmaları arasında yer alan ve nanopartiküllerin temizlenmesinden sorumlu olan retikuloendotelial sistem (RES) üzerinde yapılan çalışmalarda, 10 ila 100 nm arasında değişen çaplardaki nanopartiküllerin bir yandan RES tarafından alınması önlenirken, diğer taraftan daha uzun kan dolaşım sürelerine sahip oldukları gösterilmiştir [10]. Fakat yapılan çalışmalar incelendiğinde, aynı boyutlardaki nanopartiküllerin antikanser aktiviteleri üzerinde belirgin örtüşmeler saptanamamıştır, çünkü her tümör tipinin sahip olduğu özgün patolojik özellikleri yanında aynı tümör içindeki farklı bölgelere karşıda farklı önemli davranışlar gözlemlenmiştir [11-13]. Bundan dolayı tek bir boyuta indirgenen nanopartikül tasarımları bütün kanser tiplerine karşı en etkili yaklaşım olmayabilir. Bu nedenle nanopartikül tasarımının ilgili tam lokasyona ve koşullara (primer veya metastatik tümör, tümör evresi ve agresiflik, konakçı organ, bölgesel vasküler özellikler ve hemodinami gibi) göre dizayn edilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra nanopartikül boyutu taşıyıcı sistemlere ilaç yüklenmesi ve salınımı da etkilemektedir. Daha küçük partiküllerin yüzey alanı/hacim oranı daha büyük olduğundan ilaç salınım hızları daha yüksel olurken, büyük partiküller sahip oldukları büyük çekirdek yapıları sayesinde daha fazla ilaç yüklemesine olanak sağlarken daha yavaş bir ilaç salınım karakteri gösterirler [14-15].

Bu bilgiler ışığında bu çalışmada, ilaç taşıyıcı sistemleri olarak 100 nm'den küçük ve büyük olmak üzere iki farklı büyüklükteki nanopartiküllerin (~ 55 ve 314 nm) insan kolon kanseri Caco-2 ve HCT-116 hücrelerine karşı göstermiş oldukları antikanser aktiviteleri araştırıldı. Bunun için, yapısı daha önceki çalışmalarımızda geliştirilen ve fizikokimyasal olarak karakterize edilen bir antikanser ilaç taşıyıcı sistem olan  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)-BTN/DOX$  multifonksiyonel nanopartikül formülasyonları kullanıldı [16-18]. İlgili nanopartiküllerin, antikanser etkinlikleri, iki farklı insan

kolon kanseri hücrelerine karşı göstermiş oldukları (1) hücresel alım, (2) floresan görüntüleme, (3) sitotoksik ve (4) proapoptotik etkileri araştırılarak karşılaştırıldı.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Malzeme (Materials)

3-(4,5-dimetil-2-tiazolil)-2,5-difeniltetrazolyum bromid (MTT) ve tripsin *Sigma-Aldrich Chemicals* 'dan, %10 fetal bovin serumu (FBS), streptomisin, penisilin, L-glutamik asit, RPMI-1640 besiyeri *Gibco Life technologies* 'den temin edilmiştir. Kullanılan diğer tüm kimyasallar analitik saflıktadır ve denemeler boyunca ultra saf su kullanılmıştır.

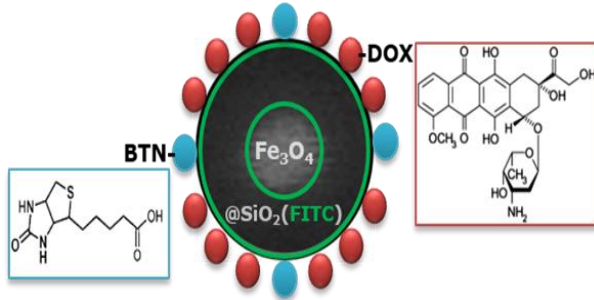
### 2.2. Hücre Kültürü (Cell Cultures)

Caco-2 ve HCT-116 (insan kolon karsinoma) hücre hatları İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Biyoteknoloji ve Biyomühendislik Araştırma ve Uygulama Merkezinden temin edildi. Kanser hücreleri, 10% (v/v) fetal bovin serumu (FBS), 100 µg/mL streptomisin, 100 U/mL penisilin ve 2 mM L-glutamik asit içeren RPMI-1640 besiyeri içinde kültüre edildi. Kültür, steril koşullar altında 37 °C de, %5 CO<sub>2</sub> ihtiva eden inkübatörde gerçekleştirildi.

### 2.3. Nanopartikül-Temelli İlaç Taşıyıcı Sistemlerin Sentezi ve Karakterizasyonu (Synthesis and Characterization of Nanoparticle-Based Drug Delivery Systems)

$Fe_3O_4@SiO_2(FITC)-BTN/DOX$  nanopartikül formülasyonuna sahip ilaç taşıyıcı sistemleri kaynakça 16 ve 17 de tarif edildiği gibi daha önceki çalışmalarımızda sentezlendi. Bunun için ilk olarak demir oksit ( $Fe_3O_4$ ) çekirdek yapısı  $Fe^{+2}/Fe^{+3}$  tuzlarının ortak çöktürülmesi yöntemiyle sentezlendi. Bu aşamada farklı boyutlarda nanopartikül elde etmek için çekirdek yapı farklı konsantrasyonlarda (0.1 ve 0.6 mL) oleik asit ile kaplanarak stabilize edildi. Nanopartiküllerin biyoyumluluk kazanması ve ayrıca fizikokimyasal metodlarla yüzeylerinin fonksiyonelleştirilebilmesi için, demir oksit çekirdek, silika polimeri ile kaplandı. Bu amaç için sol-jel kimyasından yararlanıldı ve tetraetil ortosilikat (TEOS) ile demir oksit çekirdek kaplanarak  $Fe_3O_4@SiO_2$  nanopartikül yapısı oluşturuldu. Daha sonra nanopartiküllerin hücre tarafından alındığının optik olarak izlenebilmesi için,  $Fe_3O_4@SiO_2$  nanopartikül yapısına floresan özelliğine sahip floresin izotiyosiyanat (FITC) enkapsüle edildi. Enkapsülasyon sayesinde, nanopartiküllerin fotokimyasal stabilitesini artırması sağlandı. Bu işlemler sonrasında, in vivo ve in vitro koşullarda takip edilebilen, silika manyetik-floresan [ $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)$ ] nanopartikülleri oluşturuldu. Daha sonra nanopartikül yüzeylerinin biyotin (BTN) ile esterifikasyonu sağlanarak, aktif tümör hedefleme özelliği kazandırıldı. Son adımda ise, model bir antikanser ilaç olarak doksorubisin (DOX), amin-fonksiyonel nanopartikül yüzeyine schiff-bazı kimyası ile bağlanarak  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)-BTN/DOX$

formülasyonuna sahip ilaç taşıyıcı sistemlerinin sentezi gerçekleştirildi (Şekil 1). Nanopartiküllerin fizikokimyasal karakterizasyonları, dinamik ışık saçılım spektrometresi (DLS), zeta-potansiyeli ölçümü, X-ışınları difraksiyon analizi (XRD), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve elektron mikroskobu teknikleri (SEM, STEM ve EDX) ile gerçekleştirildi [16-18].



**Şekil 1.**  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)-BTN/DOX$  nanopartikül-temelli ilaç taşıyıcı sistemlerinin şematik gösterimi. Nanopartiküllerin çekirdek-kabuk yapısı (beyaz çekirdek-gri kabuk) taramalı-geçirimli elektron mikroskobu (STEM) aracılığıyla elde edildi. Gri silika kabuk içerisine FITC enkapsülasyonu sağlandı. Nanopartiküllerin yüzeyindeki kırmızı küreler antikanser ilaç doksorubisini (DOX), mavi küreler hedefleme ajanı biyotini (BTN) temsil etmektedir. (Schematic representation of nanoparticle-based drug delivery systems  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)-BTN/DOX$ . \*The core-shell structure of the nanoparticle (white core-gray shell) was obtained from the scanning transmission electron microscopy (STEM). The FITC label (the contrast agent) encapsulated in the grey shell of the nanoparticles. Red circles represent the chemotherapeutic agent doxorubicin (DOX), whilst blue circles represent targeting agent biotin (BTN)

#### 2.4. Hücresel Alım Deneyleri (Cellular Uptake Analysis)

Farklı boyutlardaki  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)-BTN/DOX$  nanopartiküllerinin, Caco-2 ve HCT-116 kanser hücrelerini hedefleme potansiyelleri floresan mikroskopu kullanılarak araştırıldı.

Mikroskobik görüntüleme için, Caco-2 ve HCT-116 hücreleri 100.000 hücre/mL yoğunluğunda 6 kuyulu plakalarda 10  $\mu\text{g/mL}$  nanopartikül konsantrasyonunda 4 ve 12 saat boyunca inkübe edildi. İnkübasyon sonrası hücreler; nanopartiküllere enkapsüle edilen FITC için yeşil kanalda, nanopartiküllere konjuge edilen ilaç için kırmızı kanalda, hücre çekirdek boyası DAPI için mavi kanalda ve hücre genel görüntüsü için aydınlık alanda floresan mikroskobu altında optik olarak izlendi. Nanopartiküllerin hücresel alımı, Olympus IX71 floresan mikroskobu kullanılarak görüntülendi. İlgili görüntülerin fotoğrafları CCD kamera kullanılarak çekildi ve ImageJ programı kullanılarak analiz edildi.

#### 2.5. Nanopartikül-Temelli İlaç Taşıyıcı Sistemlerin Sitotoksik Etkileri (Cell Viability Analysis of Nanoparticle-Based Drug Delivery Systems)

Farklı boyutlardaki  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)-BTN/DOX$  nanopartiküllerinin, Caco-2 ve HCT-116 kanser

hücreleri üzerinde gösterdikleri sitotoksiste, MTT yöntemi kullanılarak belirlendi.

Sitotoksiste çalışmaları için, Caco-2 ve HCT-116 hücreleri 10.000 hücre/mL yoğunluğunda 96 kuyulu plakalarda 0.1 / 1.0 / 10 / 50 / 100 / 200  $\mu\text{g/mL}$  nanopartikül konsantrasyonlarıyla 24 / 48 ve 72 saat boyunca inkübe edildi. Bu inkübasyonlardan sonra, hücreler 0.5 mg/mL MTT içeren ortamda 4 saat inkübe edildi ve ardından plakalar 1800 rpm de 10 dakika boyunca santrifüj edildi. Süpernatant uzaklaştırıldıktan sonra her bir kuyucukda oluşan formazan kristalleri 150  $\mu\text{L}$  DMSO içerisinde çözüldü ve 570 nm deki absorbansları mikropilaka okuyucu aracılığıyla okunarak "yarı-maksimum inhibisyon konsantrasyonları" ( $IC_{50}$ ) belirlendi.  $IC_{50}$  değerleri GraphPad Prism 7.0 yazılımı ile hesaplandı.

#### 2.6. Nanopartikül-Temelli İlaç Taşıyıcı Sistemlerin Pro-apoptotik Etkileri (Proapoptotic effects of Nanoparticle-Based Drug Delivery Systems)

Farklı boyutlardaki  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)-BTN/DOX$  nanopartiküllerinin, Caco-2 ve HCT-116 kanser hücreleri üzerinde gösterdikleri pro-apoptotik etkileri hücre çekirdek morfolojileri aracılığıyla, DAPI boyama yöntemiyle, Olympus IX71 floresan mikroskobu kullanılarak optik olarak analiz edildi.

Zamana bağımlı apoptoz çalışmaları için, Caco-2 ve HCT-116 hücreleri 100.000 hücre/mL yoğunluğunda 6 kuyulu plakalarda  $IC_{50}$  konsantrasyonlarındaki nanopartiküllerle 24 / 48 ve 72 saat boyunca inkübe edildi. İnkübasyon sonrası fosfat tamponlu çözelti (PBS) ile yıkanan hücreler 10 dakika boyunca % 4 paraformaldehit ile fikse edildi, ardından üç defa PBS ile yıkandı. Hücreler daha sonra 10 dakika boyunca % 0.1 Triton-X ile muamele edilerek hücre membranının geçirgenliği artırıldı ve akabinde tekrardan üç defa PBS ile yıkandı. Son olarak her bir kuyu 5  $\mu\text{L}$  1 mg/mL yoğunluğundaki DAPI çözeltisi ile boyandı. Boyama sonrası hücre çekirdekleri floresan mikroskobu altında optik olarak incelendi ve yoğunlaşmış veya parçalanmış çekirdekli hücreler apoptotik hücreler olarak kabul edildi. Görüntüler ImageJ programı aracılığıyla analiz edildi.

#### 2.7. İstatistiksel Analiz (Statistical Analysis)

Tüm veriler, ortalama  $\pm$  standart sapma (SS) olarak verildi. İstatistiksel analizler Student's *t* testi kullanılarak Microsoft Excel yazılımı aracılığıyla yapıldı.  $P \leq 0.05$  değeri istatistiksel olarak anlamlı kabul edildi.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

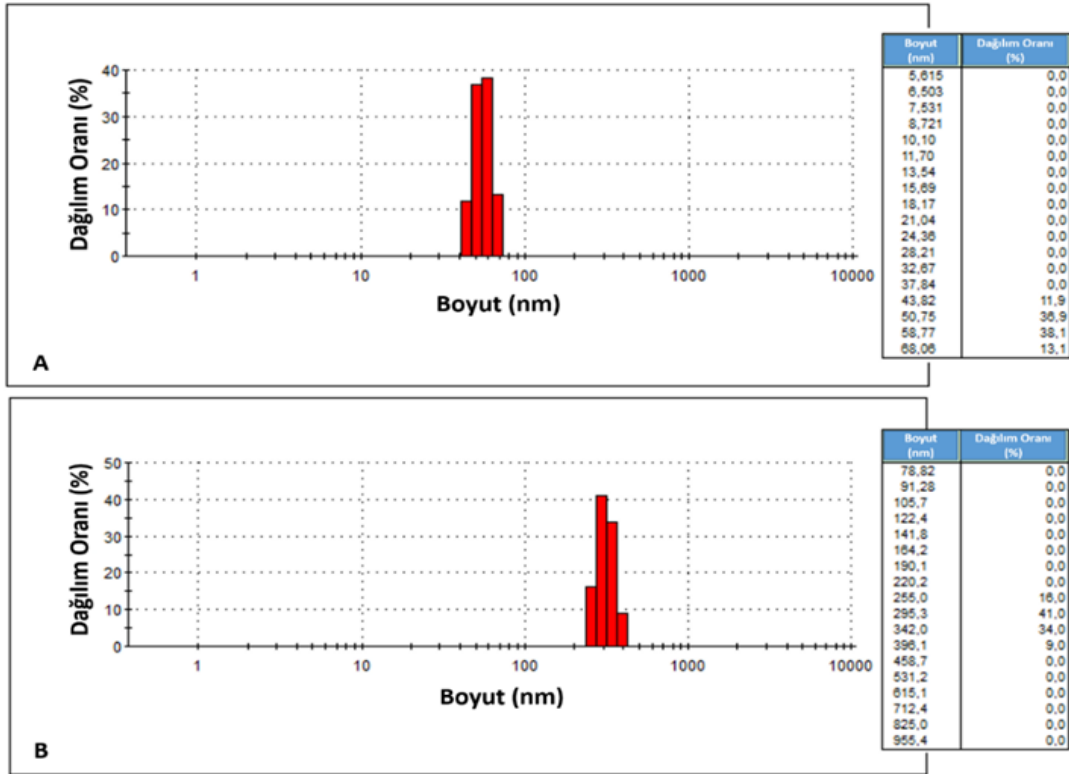
#### 3.1. Nanopartikül-Temelli İlaç Taşıyıcı Sistemlerin Sentezi ve Karakterizasyonu (Synthesis and Characterization of Nanoparticle-Based Drug Delivery Systems)

İlaç taşıyıcı sistemlerinin demir oksit ( $Fe_3O_4$ ) çekirdek yapısı [ $Fe^{+2} + 2Fe^{+3} + 8OH^- = Fe_3O_4 + 4H_2O$ ] kimyasal reaksiyon formülüne göre kaynakça 16 da gösterildiği

gibi sentezlendi. Bu aşamada inorganik çekirdek yapısı farklı konsantrasyonlarda (0.1 ve 0.6 mL) oleik asit ile kaplanarak sentez sırasında nanopartiküllerin büyüklüğü düzenlendi. Nanopartikül büyüklükleri, manyetit çekirdek üzerinde oleat iyonlarının artan konsantrasyonlarda kemisorbsiyonuna bağlı olarak, artan miktarda oleik asit ile düzenli olarak arttı. 0.1 mL oleik asit ile kaplanan  $Fe_3O_4$  nanopartiküllerinin hidrodinamik çapı yaklaşık  $5 \pm 1$  nm iken 0.6 mL oleik asit ile kaplanan nanopartiküllerin çapı yaklaşık  $19 \pm 7$  nm olarak belirlendi. Daha sonra silika polimeri ile kaplanan nanopartiküllere optik olarak izlenebilmesi için floresan özelliğine sahip FITC enkapsüle edildi ve  $[Fe_3O_4@SiO_2(FITC)]$  nanopartikül yapısı oluşturuldu. Son olarak sırasıyla nanopartikül yüzeyine bir aktif hedefleme ajanı olarak biyotin (BTN) ve model bir antikanser ilaç olarak doksorubisin (DOX) konjuge edilerek  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)$ -BTN/DOX formülasyonuna sahip nanopartikül-temelli ilaç taşıyıcı sistemleri sentezlendi. Hızla bölünen kanser hücreleri, özellikle hızlı büyümelerini sürdürebilmek için belirli vitaminlere aşırı ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle vitamin alınmasına katılan reseptörler, kanserleşen hücre yüzeylerinde aşırı miktarda ifade edilmeye başlamaktadır [19]. Bu reseptör artışları sayesinde, vitamin-bağlantılı bu tür ilaç taşıma sistemleri daha yüksek afinitede tümör hücrelerini aktif olarak hedefleyebilmektedir. Hedefleme ajanı ve ilaç konjugasyonu adımları sonrası nanopartiküllerin hidrodinamik çapları sırasıyla yaklaşık  $55 \pm 7$  ve  $314 \pm 39$  nm olarak belirlendi (Şekil 2).

### 3.2. Nanopartikül-Temelli İlaç Taşıyıcı Sistemlerinin Hüresel Alımı (Cellular Uptake Analysis of Nanoparticle-Based Drug Delivery Systems)

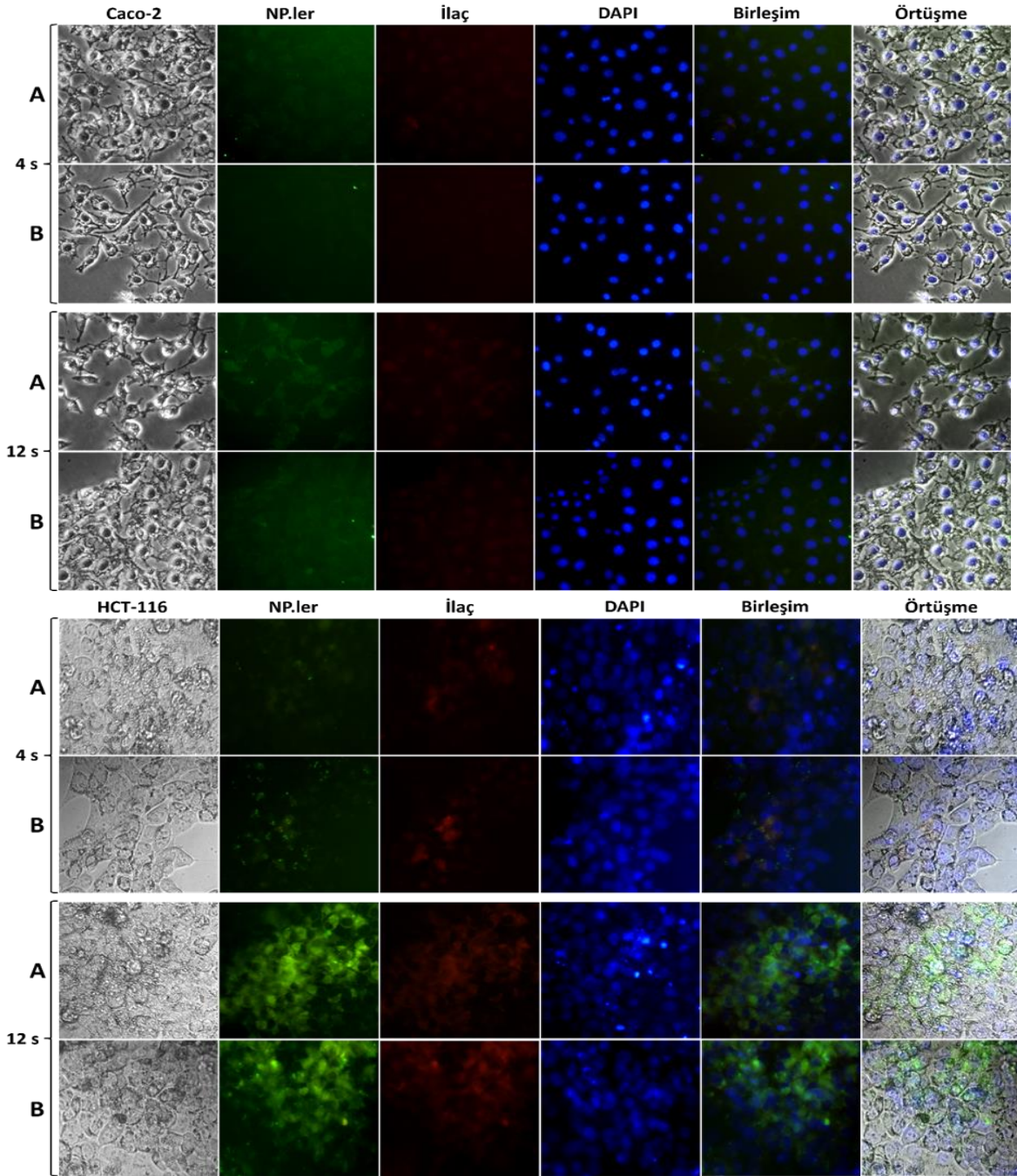
Farklı boyutlardaki  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)$ -BTN/DOX nanopartiküllerinin Caco-2 ve HCT-116 kanser hücrelerini hedefleme potansiyellerinin araştırılması için aydınlık alan ve floresan mikroskop görüntüleri çekildi (Şekil 3). Nanopartiküllerin hüresel lokalizasyonları, floresan görüntülerine karşılık gelen aydınlık alan görüntülerinin karşılaştırılmasıyla elde edildi. Hüresel alımı takip etmek için hücre çekirdeği ayrıca DAPI ile boyandı. Her iki boyuttaki nanopartikülün zamana bağımlı olarak artan oranlarda kanser hücrelerini hedefleyebildiği, fakat küçük nanopartiküllerin Caco-2 hücrelerindeki hücre içi floresan yoğunluklarının, büyük nanopartiküllerle karşılaştırıldığında, daha yüksek olduğu belirlendi. 4 saatlik inkübasyon sonrası küçük partiküllerin Caco-2 hücre içi yoğunlukları büyük partiküllere oranla daha yüksekken, 12 saatlik inkübasyon sonrası büyük partiküllerin hücre içi birikim yoğunluklarının küçük partiküllerin seviyesine ulaştığı belirlendi. HCT-116 kanser hücrelerinde ise, her iki boyuttaki nanopartikül de zamana bağımlı olarak benzer hücre içi yoğunluklara ulaşırken, 12 saatin sonunda, Caco-2 hücreleri ile karşılaştırıldığında, daha fazla hücre içi partikül birikim verimi elde edildi. Bu sonuçlar,  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)$ -BTN/DOX formülasyonuna sahip ilaç taşıyıcı sistemlerinin Caco-2 ve HCT-116 kolon kanseri hücrelerine başarılı bir şekilde nüfuz



Şekil 2. (A) 0.1 mL oleik asit stabilize ve (B) 0.6 mL oleik asit stabilize  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)$ -BTN/DOX nanopartiküllerinin boyut-dağılım grafikleri. ( Size distribution of (A) 0.1 mL and (B) 0.6 mL oleic acid stabilized  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)$ -BTN/DOX nanoparticles)

edebildiğini, fakat Caco-2 hücreleri ile karşılaştırıldığında, HCT-116 hücrelerine karşı her iki boyuttaki nanopartikülün de yüksek afiniteye sahip olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar, ilaç

taşıyıcı sistemlerinin tümör tipine göre tasarlanması gerekliliğini vurgulamaktadır.



**Şekil 3.** Caco-2 ve HCT-116 hücrelerinin (A) küçük ve (B) büyük boyuttaki nanopartiküller ile 4 ve 12 saatlik inkübasyonları sonrası hücresel alım floresan mikroskobu görüntüleri. Sütunlar için sırasıyla: (1) Caco-2 ve HCT-116 hücrelerinin aydınlık alan görüntüleri; (2) hücre içindeki nanopartiküllerin yeşil floresan görüntüleri; (3) hücre içine taşınan doksorubisinin kırmızı floresan görüntüleri; (4) DAPI ile boyanan hücre çekirdeklerinin mavi floresan görüntüleri; (5) nanopartikül, ilaç ve DAPI floresan görüntülerinin üst üste birleştirilmesi; (6) aydınlık alan, nanopartikül, ilaç ve DAPI görüntülerinin üst üste örtüştürülmesi. (Fluorescence microscopy images of Caco-2 and HCT-116 cells after incubation with (A) small and (B) large nanoparticles for 4 and 12 h. The nanoparticles were observed as green fluorescence, DOX was observed as red fluorescence and DAPI was observed as blue fluorescence. For columns: (1) bright-field images; (2) fluorescence images of nanoparticles; (3) fluorescence images of DOX; (4) the stained nuclei of cells with DAPI; (5) the merger of nanoparticles, DOX and DAPI; and (6) overlay of bright-field images and fluorescence images)

### 3.3. Nanopartikül-Temelli İlaç Taşıyıcı Sistemlerin Sitotoksik Etkileri (Cell Viability Analysis of Nanoparticle-Based Drug Delivery Systems)

Farklı boyutlardaki  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)$ -BTN/DOX nanopartiküllerinin Caco-2 ve HCT-116 kanser hücreleri üzerinde nasıl bir sitotoksik etki gösterdiğini incelemek için, zamana bağımlı MTT hücre proliferasyonu analizi yapıldı. Bunun için, kanser hücrelerine 24 / 48 ve 72 saat boyunca artan konsantrasyonlarda (0.1-200  $\mu g/mL$ ) nanopartiküller uygulandı.  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)$ -BTN/DOX nanopartikülleri, Caco-2 hücreleri ile karşılaştırıldığında, HCT-116 hücrelerine karşı ilk 48 saatlik süreçte daha düşük  $IC_{50}$  değeri ile daha güçlü bir sitotoksik etki sergiledi. Öte yandan, nanopartiküller 72 saatlik inkübasyon sonrası her iki hücrede de benzer  $IC_{50}$  değerleri ile yakın sitotoksik etki gösterdi. Küçük partiküller, büyük

sonuçlarını desteklerken ilgili nanopartikül formülasyonlarının HCT-116 kanser türüne karşı daha yüksek sitotoksik potansiyele sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 4). Büyük partiküller daha uzun inkübasyon süreleri sonrası küçük partiküllerin gösterdiği sitotoksik değerlere ulaşmaktadır. Bunun nedeni olarak, küçük partiküllerin hücresel alım verimliliklerinin daha yüksek olduğundan bahsedebileceğimiz gibi, küçük partiküllerin yüzey alanı/hacim oranı büyük partiküllere göre daha büyük olduğundan ilaç salınım hızları daha yüksel olmaktadır, fakat büyük partiküller sahip oldukları büyük çekirdek yapıları sayesinde daha fazla ilaç yüklemesine olanak sağlarken daha yavaş bir ilaç salınım karakteri gösterdiklerinden sitotoksik etkileri ancak zamana bağımlı olarak artış göstermektedir [14-15]. Benzer bir şekilde daha önce yaptığımız çalışmalarda da, ilaç taşıma sistemleri olarak tasarladığımız nanopartiküller,

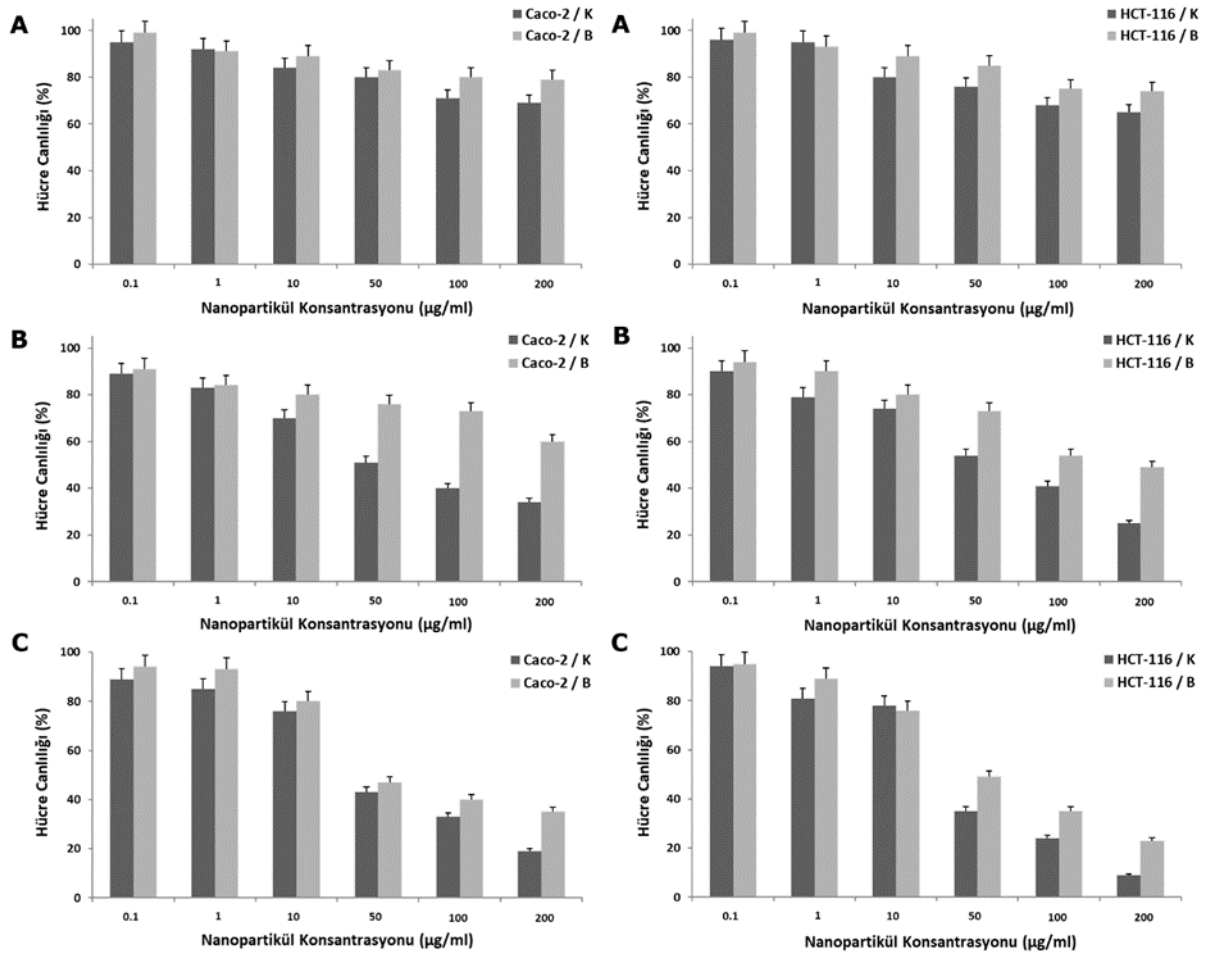
**Çizelge 1.** Farklı boyutlardaki  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)$ -BTN/DOX nanopartikül formülasyonlarının Caco-2 ve HCT-116 hücrelerindeki 24 / 48 ve 72 saatlik  $IC_{50}$  değerleri. Değerler üç bağımsız denemenin ortalama  $\pm$ SS'sını temsil etmektedir. (The  $IC_{50}$  values of different sized  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)$ -BTN/DOX nanoparticles in Caco-2 and HCT-116 cells when incubated for 24 /48 and 72 h. Values represent the mean  $\pm$  SD of three independent experiments)

Hücreler	Nanopartiküller ( $\mu g/mL$ )	24 saat	48 saat	72 saat
Caco-2	Küçük NP'ler	325.3 $\pm$ 34.5	103.6 $\pm$ 9.3	81.9 $\pm$ 9.9
	Büyük NP'ler	531.2 $\pm$ 48.8	274.7 $\pm$ 20.7	98.7 $\pm$ 5.3
HCT-116	Küçük NP'ler	271.4 $\pm$ 22.3	95.3 $\pm$ 13.9	68.8 $\pm$ 4.6
	Büyük NP'ler	380.7 $\pm$ 35.7	167.2 $\pm$ 12.4	92.5 $\pm$ 6.8

partiküller ile karşılaştırıldığında, her iki kolon kanseri türüne karşı ilk 48 saatlik süreçte daha sitotoksik etki gösterirken, 72 saate varan inkübasyonlar sonrası her iki partikülde benzer  $IC_{50}$  değerleri sergiledi (Çizelge 1). Bu sonuçlar, ilaç taşıyıcı sistemlerin hücresel alım

biyokimyasal profilleri birbirlerinden farklı olan çeşitli kanser hücrelerine karşı değişen oranlarda sitotoksik etki sergilemiştir [16-18,20-21].



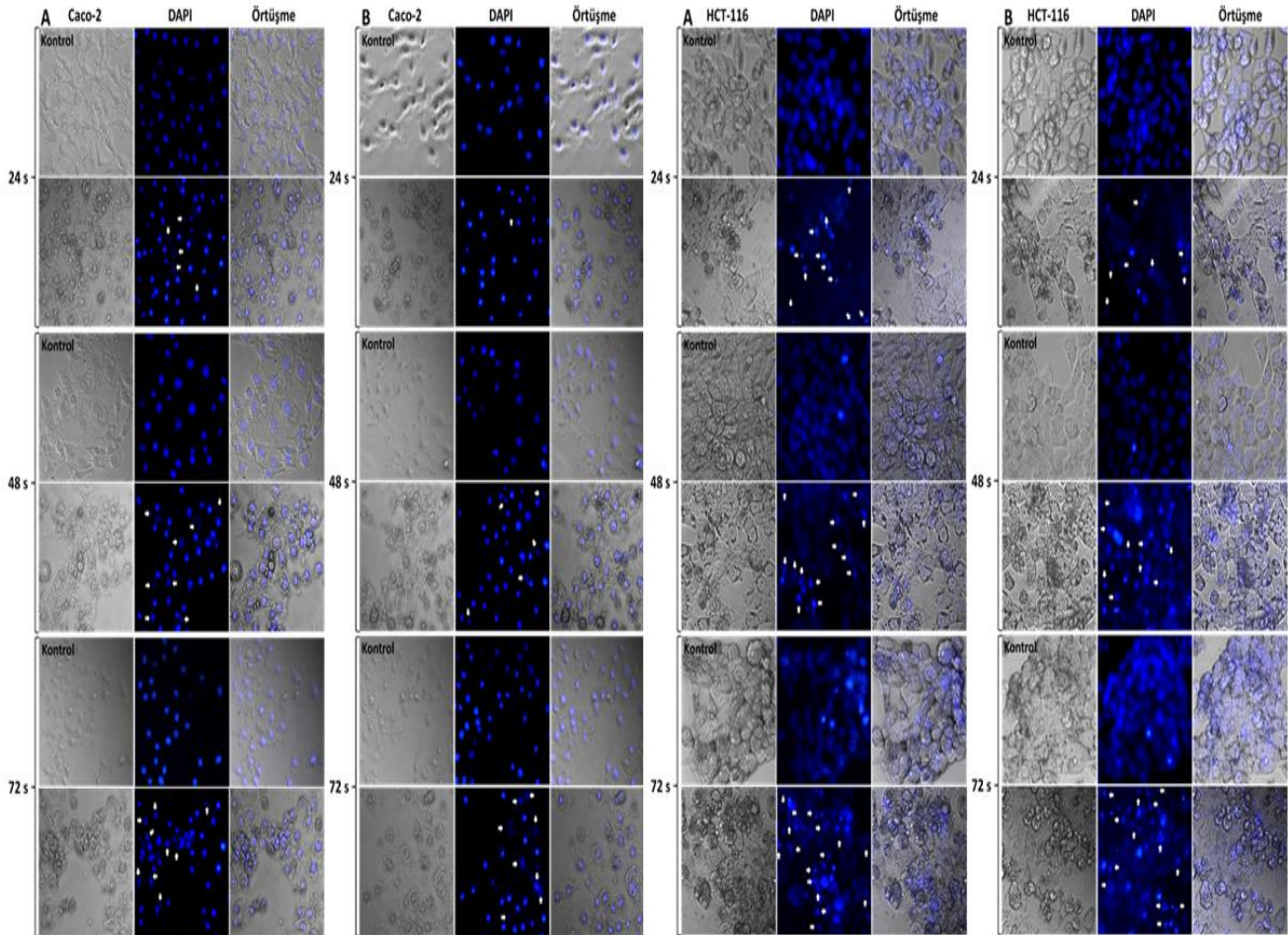


**Şekil 4.** Farklı boyutlardaki  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)-BTN/DOX$  nanopartikül formülasyonlarının Caco-2 ve HCT-116 hücreleri üzerinde gösterdiği (A) 24, (B) 48 ve (C) 72 saatlik antikanser aktiviteleri. K: küçük nanopartiküller B: büyük nanopartiküller. Her bir kolon üç bağımsız denemenin ortalama  $\pm$ SS'sını temsil etmektedir. (Anticancer activities of different sized  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)-BTN/DOX$  nanoparticles against Caco-2 and HCT-116 cells after (A) 24, (B) 48 and (C) 72 of growth. K: small and B: large nanoparticles. Each column represents the mean  $\pm$  SD of three independent experiments)

### 3.4. Nanopartikül-Temelli İlaç Taşıyıcı Sistemlerin Pro-apoptotik Etkileri (Proapoptotic effects of Nanoparticle-Based Drug Delivery Systems)

Farklı boyutlardaki  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)-BTN/DOX$  nanopartiküllerinin Caco-2 ve HCT-116 kanser hücreleri üzerinde gösterdiği 24 / 48 ve 72 saatlik apoptotik etkileri, floresan mikroskopu altında yoğunlaşmış veya parçalanmış çekirdekli hücreler incelenerek araştırıldı. Şekil 5. de görüldüğü üzere  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)-BTN/DOX$  nanopartikülleri, Caco-2 hücreleri ile karşılaştırıldığında, HCT-116 hücrelerine karşı daha yüksek düzeyde apoptoz indüksiyonu gerçekleştirdi. Büyük partiküller Caco-2 hücrelerine karşı ancak 72

saatlik süreç sonunda kayda değer bir apoptotik etki gösterirken, HCT-116 hücrelerinde küçük partiküllerle benzer oranlarda bir apoptotik etki sergiledi. Bu sonuçlar göstermektedir ki,  $Fe_3O_4@SiO_2(FITC)-BTN/DOX$  nanopartikülleri HCT-116 kanser hücrelerine daha hızlı bir şekilde kemoterapötik ajan yüklemesi sağlamakta ve bu sayede DOX-aracılı apoptoz oranlarını Caco-2 kanser hücrelerine oranla aynı zaman dilimi içerisinde daha yukarı seviyelere taşımaktadırlar. Bununla birlikte, nanopartikül boyutları HCT-116 kolon kanser türüne karşı apoptotik aktiviteyi etkilemezken, Caco-2 kanser türünde ise hücre alım düzeyleri daha yüksek olan küçük nanopartiküllerin daha yüksek oranlarda apoptotik etki sergilediği görülmüştür.



**Şekil 5.** Caco-2 ve HCT-116 hücrelerinin (A) küçük ve (B) büyük boyuttaki nanopartiküller ile 24, 48 ve 72 saatlik inkübasyonları sonrası apoptotik çekirdeklerinin floresan mikroskobu görüntüleri. İlk satırlar nanopartikül uygulanmayan kontrol hücreleri ve çekirdeklerini göstermektedir. Oklarla gösterilen apoptotik hücreler nükleer parçalanma ve daha parlak mavi floresans göstermektedir. Sütunlar için sırasıyla: (1) Caco-2 ve HCT-116 hücrelerinin aydınlık alan görüntüleri; (2) DAPI ile boyanan hücre çekirdeklerinin mavi floresan görüntüleri; (3) aydınlık alan ve DAPI görüntülerinin üst üste örtüştürülmesi. (Apoptosis analysis of Caco-2 and HCT-116 cells treated with small (K) and large (B) nanoparticles for 24, 48 and 72 h, by fluorescence microscopy. Untreated cells served as control cells. Morphological changes of cell nuclei stained with DAPI were observed under fluorescence microscopy and arrows indicated apoptotic cells present nuclear fragmentation and brighter blue fluorescence. For columns: (1) bright-field images; (2) the stained nuclei of cells with DAPI; (3) overlay of bright-field images and fluorescence images of DAPI)

#### 4. GENEL DEĞERLENDİRME (CONCLUSION)

Bu çalışmada, iki farklı büyüklükteki nanopartikül-temelli ilaç taşıyıcı sistemlerin, insan kolon kanseri Caco-2 ve HCT-116 hücrelerine karşı göstermiş oldukları antikanser aktiviteleri araştırıldı. Bunun için nanopartikül boyutlarının kolon kanseri hücrelerine karşı göstermiş oldukları hücresel birikim, sitotoksosite ve apoptoz üzerindeki etkileri karşılaştırıldı. Hücresel alım deneyleri ile her iki boyuttaki nanopartikülün zamana bağımlı olarak artan oranlarda kanser hücrelerini hedefleyebildiği, fakat küçük nanopartiküllerin Caco-2 kanser hücreleri tarafından alım kapasitelerinin büyük nanopartiküllere oranla daha yüksek olduğu belirlendi. Öte yandan, her iki hücre türünde de ilk 48 saat içinde küçük nanopartiküller, büyük nanopartiküllere göre daha düşük yarı-maksimum inhibisyon konsantrasyonu ( $IC_{50}$ )

değerleri ile daha yüksek sitotoksosite sergilerken, 72 saate varan inkübasyon süreleri sonrası iki farklı boyuttaki nanopartikülde benzer  $IC_{50}$  değerlerine ulaştı. Pro-apoptotik çalışmalarda, nanopartikül boyutları HCT-116 kolon kanser türüne karşı apoptotik aktiviteyi kayda değer bir oranda etkilemezken, Caco-2 kanser türünde ise hücresel alım düzeyleri ile paralel doğrultuda küçük nanopartiküller daha yüksek oranlarda apoptotik aktivite sergiledi. Bu sonuçlar göstermektedir ki, nanopartikül boyutları HCT-116 kolon kanseri türüne karşı antikanser aktiviteyi çok fazla etkilemezken, Caco-2 kanser türünde ise, nanopartikül boyutlarına göre hücresel alım seviyeleri değişmekte ve bu durum hücre içi ilaç konsantrasyonlarını etkilediği için paralelinde antikanser aktivitede etkilenmektedir. Sonuç olarak bu gözlemler, küçük boyutlu ilaç taşıma sistemlerinin, büyük boyutlu

ilaç taşıma sistemleri ile karşılaştırıldığında, insan kolon kanseri hücrelerinde kemoterapötik ilaçların antikanser etkilerini artırmada daha verimli olduğunu göstermektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Laboratuvarından çalışma fırsatı sağladığı için İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü'nden Sayın Hocam Doç. Dr. Alper Arslanoğlu'na en içten dileklerle teşekkür ederim.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Müller R. H, Jacobs C. and Kayser O., “Nanosuspensions as particulate drug formulations in therapy: Rationale for development and what we can expect for the future”, *Adv Drug Deliv Rev.*, 47: 3–19, (2001)
- [2] Jaracz S., Chen J., Kuznetsova L. V. and Ojima I., “Recent advances in tumor-targeting anticancer drug conjugates”, *Bioorg. Med. Chem.*, 13: 5043–5054, (2005)
- [3] Müller R. H. and Peters K., “Nanosuspensions for the formulation of poorly soluble drugs: I. Preparation by a size-reduction technique”, *Int J Pharm.*, 160: 229–237, (1998)
- [4] Rizzo L. Y., Theek B., Storm G., Kiessling F. and Lammers T., “Recent progress in nanomedicine: therapeutic, diagnostic and theranostic applications”, *Curr. Opin. Biotechnol.*, 24: 1159–1166, (2013)
- [5] Shapira A., Livney Y. D., Broxterman H. J. and Assaraf Y. G., “Nanomedicine for targeted cancer therapy: towards the overcoming of drug resistance”, *Drug Resist Updat.*, 14: 150–163, (2011)
- [6] Sun C., Lee J. S. and Zhang M., “Magnetic nanoparticles in MR imaging and drug delivery”, *Adv Drug Deliv Rev.*, 60: 1252–1265, (2008)
- [7] Park J. H., von Maltzahn G., Ruoslahti E., Bhatia S. N. and Sailor M. J., “Micellar hybrid nanoparticles for simultaneous magneto-fluorescent imaging and drug delivery”, *Angew Chem Int Ed Engl.*, 47: 7284–7288, (2008)
- [8] Sykes E. A., Chen J., Zheng G. and Chan W. C., “Investigating the Impact of Nanoparticle Size on Active and Passive Tumor Targeting Efficiency”, *ACS Nano.*, 8: 5696–706, (2014)
- [9] Danhier F., Feron O. and Préat V., “To exploit the tumor microenvironment: passive and active tumor targeting of nanocarriers for anti-cancer drug delivery”, *J. Control. Release*, 148: 135–146, (2010)
- [10] Laurent S., Forge D., Port M., Roch A., Robic C., Elst L. V. and Muller R. N., “Magnetic iron oxide nanoparticles: synthesis, stabilization, vectorization, physicochemical characterizations, and biological applications”, *Chem. Rev.*, 108: 2064–2110, (2008)
- [11] Uchiyama K., Nagayasu A., Yamagiwa Y., Nishida T., Harashima H. and Kiwada H., “Effects of the size and fluidity of liposomes on their accumulation in tumors: A presumption of their interaction with tumors”, *Int. J. Pharm.*, 121: 195–203, (1995)
- [12] Nagayasu A., Shimooka T., Kinouchi Y., Uchiyama K., Takeichi Y. and Kiwada H., “Effects of fluidity and vesicle size on antitumor activity and myelosuppressive activity of liposomes loaded with daunorubicin”, *Biol Pharm Bull.*, 17: 935–939, (1994)
- [13] Nagayasu A., Uchiyama K. and Kiwada H., “The size of liposomes: a factor which affects their targeting efficiency to tumors and therapeutic activity of liposomal antitumor drugs”, *Adv Drug Deliv Rev.*, 40: 75–87, (1999)
- [14] Gao J. H., Gu H. W. and Xu B., “Multifunctional magnetic nanoparticles: design, synthesis, and biomedical applications”, *Acc. Chem. Res.*, 42: 1097–1107, (2009)
- [15] Lee J. E., Lee N., Kim H., Kim J., Choi S. H., Kim J. H., Kim T., Song I. C., Park S. P., Moon W. K. and Hyeon T., “Uniform mesoporous dye-doped silica nanoparticles decorated with multiple magnetite nanocrystals for simultaneous enhanced magnetic resonance imaging, fluorescence imaging, and drug delivery”, *J. Am. Chem. Soc.*, 132: 552–557, (2010)
- [16] Daglioglu C. and Okutucu B., “Synthesis and characterization of AICAR and DOX conjugated multifunctional nanoparticles as a platform for synergistic inhibition of cancer cell growth”, *Bioconjug. Chem.*, 27: 1098–1111, (2016)
- [17] Daglioglu C., “Enhancing tumor cell response to multidrug resistance with pH-sensitive quercetin and doxorubicin conjugated multifunctional nanoparticles”, *Colloids Surf. B Biointerfaces*, 156: 175–185, (2017)
- [18] Daglioglu C., “Environmentally responsive dual-targeting nanoparticles: improving drug accumulation in cancer cells as a way of preventing anticancer drug efflux”, *J. Pharma. Sci.*, 107: 934–941, (2018)
- [19] Russell-Jones G., McTavish K., McEwan J., Rice J. and Nowotnik D., “Vitamin-mediated targeting as a potential mechanism to increase drug uptake by tumors”, *J. Inorg. Biochem.*, 98: 1625–1633, (2004)
- [20] Daglioglu C. and Okutucu B., “Therapeutic effects of AICAR and DOX conjugated multifunctional nanoparticles in sensitization and elimination of cancer cells via survivin targeting”, *Pharm. Res.*, 34: 175–84, (2017)
- [21] Daglioglu C., “İlaç Taşıma Sistemleri olarak Nanopartiküller kullanılarak Pasif ve Aktif Tümör Hedeflemelerinin Karşılaştırmalı İncelenmesi”, *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 6: 01-07, (2018)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Isı-güç kombine sistemlerinde kullanılan kalina çevriminin enerji ve ekserji analizi

## *Energy and exergy analysis of a kalina cycle used for combined heat-power systems*

Yazar(lar) (Author(s)): Yıldız KOÇ<sup>1</sup>, Hüseyin YAĞLI<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-9777-0698

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-2219-645X

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Koç Y. ve Yağlı H., “Isı-güç kombine sistemlerinde kullanılan kalina çevriminin enerji ve ekserji analizi”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 181-188, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.528793

# Isı-Güç Kombine Sistemlerinde Kullanılan Kalina Çevriminin Enerji ve Ekserji Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Yıldız KOÇ\*, Hüseyin YAĞLI**

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İskenderun Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 19.02.2019 ; Kabul/Accepted : 18.07.2019)

## ÖZ

Küresel ısınmanın giderek arttığı ve hava kirliliğinin insan sağlığını hissedilebilir şekilde tehdit ettiği bugünlerde, enerjiye olan ihtiyaç da giderek artmaktadır. Bu nedenle sadece insanların enerji ihtiyacını karşılamak değil bunun yanında çevreyi tehdit eden unsurların da minimum seviyelere indirilmesi hedeflenmektedir. Enerji ihtiyacını karşılamak için araştırmacılar farklı enerji üretim sistemleri üzerinde çalışmalar yapmakta ya da var olan tesislerin kapasitesini arttırmaktadır. Ancak, küresel ısınma ve hava kirliliğinin en önemli sebeplerinden biri olan endüstriyel atık ısı ve baca gazları atmosfere bırakılarak büyük bir enerji israfına sebep olmaktadır. Bu nedenle, kullanılmakta olan tesislerin iyileştirilmesi ve atık ısıların geri kazanımı hayati derecede önem arz etmektedir. Bu çalışmada kombine ısı-güç çevrimindeki orta derece sıcaklıktaki atık ısının geri dönüşümünü sağlamak için yeni bir metot olan Kalina çevrimi tasarlanmıştır. Sonrasında tasarlanmış olan Kalina çevriminin birinci ve ikinci kanun yönünden termodinamik analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda, maksimum ekserji yıkımı buharlaştırıcıda görülürken, Kalina çevriminin enerji verimi ve ekserji verimi sırasıyla yaklaşık %12 ve %27 olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kalina çevrimi, ısı-güç kombine sistemi, enerji, ekserji, atık ısı geri kazanımı.

## Energy and Exergy Analysis of a Kalina Cycle Used for Combined Heat-Power Systems

### ABSTRACT

Nowadays, when global warming is increasing and air pollution threatens human health in a sensible way, the need for energy is increasing. Therefore, it is aimed not only to meet the people's energy needs but also to minimize the factors that threaten the environment. To meet the energy needs, researchers are working on different power generation systems or trying to increase the capacity of existing plants. However, industrial waste heat and flue gases, one of the most important reasons of global warming and air pollution, are released to the atmosphere and cause a great waste of energy. Therefore, the improvement of the facilities in use and the recovery of waste heat are of vital importance. In this study, the Kalina cycle, which is a new method for recovering the waste heat has been designed for a medium temperature waste heat source released from a combined heat-power system. Afterwards, the thermodynamic analysis of the designed Kalina cycle was carried out in terms of the first and second law of the thermodynamics. As a result of the study, maximum exergy destruction was observed in evaporator, while energy efficiency and exergy efficiency of Kalina cycle were calculated as 12% and 27%, respectively.

**Keywords:** Kalina cycle, combined heat-power system, energy, exergy, waste heat recovery

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji ihtiyacının büyük bir bölümü fosil yakıtlardan (%87) karşılanmaktadır [1,2]. Enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan fosil yakıtların %28'i Kömür, %21'i Doğal gaz ve %38'i petrolden oluşmaktadır [3]. Hava kirliliği ve küresel ısınma gibi çevresel sorunların en önemli sebeplerinden biri fosil yakıtlı enerji üretim tesisleri olmasına rağmen, temiz alternatif enerji kaynaklarının kullanımı %13'lerde kalmaktadır [1]. Dünya nüfus yoğunluğundaki artış ve teknolojik gelişmelerdeki ilerlemelerden dolayı enerji ihtiyacının ciddi oranda artması bilim insanlarını farklı enerji üretim araçlarına yönlendirmektedir [4-6]. Ancak, enerji üretimini arttırmanın tek yolu bu değildir. Kullanılmakta

olan tesisler iyileştirilmeli, yeni nesil entegre sistemler kullanılarak üretilen ısıdan maksimum seviyede faydalanılmalı ve enerji israfı en aza indirilmelidir. Böylece hem enerjiye olan talep azalacak hem de fosil yakıtların sebep olduğu küresel ısınma ve hava kirliliği gibi sağlığı tehdit eden çevresel sorunlar ciddi oranda düşürülecektir [7-9]. Fosil yakıtların yaklaşık %30'u egzoz gazları yoluyla atmosfere atılmaktadır [10]. Bu nedenle endüstriyel atık ısı kaynağından faydalanılmasıyla oldukça fazla enerji tasarrufu sağlanacaktır

Baca gazı ve endüstriyel atık ısılar genel olarak düşük sıcaklıklı atık ısı olarak enerji geri dönüşümü olmadan atmosfere bırakılmaktadır. Bu nedenle atık ısıdan tasarruf sağlamak ve atık ısıyı elektrik enerjisine çevirmek için geleneksel çevrimleri kullanmak uygun değildir. Geleneksel çevrimler yerine yeni yardımcı

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : yildiz.koc@iste.edu.tr

çevrimlere ihtiyaç olmaktadır. 1980'li yıllarda Alexander I. Kalina tarafından düşük sıcaklıklı atık ısıya sahip kurulu bir sistemden maksimum verim sağlamak için yeni bir yardımcı çevrim ileri sürmüştür [4]. Çalışma akışkanı olarak amonyak-su karışımı kullanan Kalina çevrimi, organik Rankine çevrimine karşı ciddi bir rakip olarak öne çıkmaktadır [11-14]. Kalina çevriminin hem çevreye olan etkisi hem de çalışma akışkanının ucuz olmasından dolayı araştırmacıların gün geçtikçe ilgisini çekmeye devam etmektedir. Zhang ve ark. (2012) Kalina çevrimi üzerine kapsamlı bir araştırmaya çalışmasında yer vermektedir. Kalina çevriminin jeotermal güç çevrimi, dizel yakıtlı kombine çevriminin yanı sıra kömür yakıtlı termik santraller ve nükleer santrallerde kullanıma uygun olduğunu açıklamışlardır. Ayrıca, Kalina çevriminin avantaj ve dezavantajlarından ve çevreye olan etkilerinden bahsetmişlerdir [4]. Ogriseck (2009) tarafından yapılan çalışmada ısı ve güç üretiminin olduğu kombine tesiste atık ısıdan faydalanmak için kullanımı yaygın olmayan Kalina çevrimini entegre etmiş ve termodinamik analizini gerçekleştirmiştir. Analiz sonucunda Kalina çevriminin soğutma suyu sıcaklığı ve amonyak-su karışımı oranına bağlı olarak %12,3-%17,1 arasında olduğu ve sisteme 2,3 MW'lık bir ısı girişi için 320 kW-440 kW arasında elektrik üretimi sağlandığını ileri sürmüştür [15]. Zare ve ark. (2015) bu çalışmada Gaz Türbini-Modüler Helyum Reaktör (GT-MHR)'den atmosfere atılan baca gazı enerji geri dönüşümü için Kalina ve Organik Rankine Çevrimi (ORC) ayrı ayrı entegre edilmiştir. Termodinamik analizler sonucunda Kalina ve ORC sisteminin verimi GT-MHR sistemine göre sırasıyla %11,3 ve %10,3 daha fazla olduğunu ortaya çıkarmışlardır [16]. İbrahim ve ark. (1993) gaz türbininden dışarı atılan atık ısının geri dönüşümü için amonyak-su karışımı çalışma akışkanına sahip kalina çevrimini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda aynı şartlar altında Kalina çevriminin veriminden %10-%20 arasında daha fazla olduğunu ortaya çıkarmışlardır [17]. Kalina çevrimi birçok farklı enerji üretim sistemlerine entegre edilebilmekte ve sistemin toplam enerjisine kayda değer bir katkı sağlamaktadır. Kalina sisteminin Nükleer enerji çevrimine uygulanabilirliği üzerine çalışan Ganesh ve ark. (2019), çevrime düşük ve yüksek sıcaklıklı Kalina çevrim sistemini entegre etmiştir. Düşük sıcaklıklı Kalina çevrimi kaynak olarak güneş enerjisi kullanılırken 129 kW elektrik enerjisi elde ederken yüksek sıcaklıklı Kalina çevrimi yüksek basınçlı suyun sıcaklığından faydalanarak 675 kW elektrik enerjisi elde etmiştir [18]. Rodriguez ve ark. (2013) ise Kalina ve organik Rankine çevrimi yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan jeotermal enerji sistemine dahil etmişlerdir. Bu çevrimler termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu yönünden uygunlukları karşılaştırılmıştır. Hem organik Rankine hem de Kalina için sırasıyla en iyi performansı veren çalışma akışkanı (R-290) ve amonyak-su (%84 amonyak) karışım oranı seçilmiştir. Bu çalışma şartları altında Kalina sistemi organik Rankine çevriminden yaklaşık %18 daha fazla güç ürettiği görülmüştür [19].

Düşük kaynama noktasına sahip organik kimyasal akışkan kullanan ORC sistemi atık ısıdan faydalanarak enerji geri kazanımı için alternatif yöntemlerden biri olmasına rağmen hem organik akışkanın pahalı olması hem de bazı organik akışkanların ozon tabakasına zarar vermesi Kalina çevrimini ön plana çıkarmaktadır [12]. Kalina çevrimi ve ORC üzerine yapılan çalışmalara baktığımızda, Bombardo ve ark. (2010) tarafından kaleme alınan dizel motorlu kombine çevriminin atık ısı geri dönüşümü için Kalina ve ORC sisteminin karşılaştırmalı termodinamiksel analizi yapılmıştır. Ayrıca bu sistemlerin avantaj ve dezavantajları hakkında önemli bilgiler verilmiştir. Çalışma sonucunda Kalina sistemi, tek ve çift basınçlı alt kritik ORC sisteminden sırasıyla yaklaşık %45 ve %25 daha fazla güç elde edildiğini ortaya çıkarmışlardır [20]. Diğer bir çalışmada ise Kalina çevriminde kullanılan türbin ölçü parametrelerinin ORC sisteminde kullanılan türbin parametrelerinden daha küçük olduğunu, ancak ORC'nin Kalina çevriminden daha düşük basınçlarda çalışabildiği söylenmektedir [21].

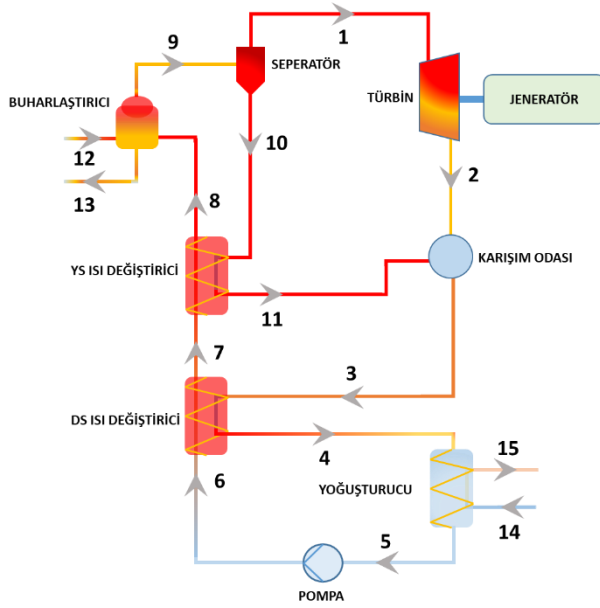
Yapılmış olan literatür çalışmaları detaylı olarak incelendiğinde atık ısı kaynaklarının enerji geri kazanımı için daha çok organik Rankine çevrimlerinin tercih edildiği görülmektedir. Fakat her ne kadar Kalina çevrimler daha az uygulama alanına sahip olsa da birçok konuda ORC çevrimlerinden daha üstün özelliklere sahip olduğu şüphesizdir. Dahası, Literatür çalışmalarında ısı-güç kombine çevrimlerinin atık enerjisinin geri kazanımı üzerine neredeyse hiç çalışma bulunmamaktadır ve yapılmış olan çalışmaların çoğunluğu sadece parametrik optimizasyon içermekte olup çevrimin ve çevrim elemanlarının detaylı ekserji analizleri üzerine detaylı bir analiz neredeyse hiç yoktur.

Bu çalışmada, gerçek bir ısı-güç kombine çevriminde mevcut durumda atmosfere salınmakta olan 400 °C sıcaklıktaki ve 1,63 kg/s debideki egzoz gazı atık ısının geri kazanımı üzerine çalışılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle Steag GbmH firması tarafından geliştirilen EBSILON®Professional programı kullanılarak tasarlanmış olan Kalina çevrimi için optimum amonyak-su oranı belirlenmiştir. Belirlenen bu karışım oranı baz alınarak çevrimin ve çevrim elemanlarının enerji ve ekserji temelli analizleri yapılarak sistemden elde edilebilecek maksimum güç miktarı belirlenmiştir.

## 2. KALINA SİSTEMİNİN TANITILMASI (DESCRIPTION OF THE KALINA SYSTEM)

Kalina çevrimlerinin ilk tasarımları 1980 yıllarına dayanmaktadır. Tıpkı organik Rankine çevrimleri gibi, Kalina çevrimleride düşük ve orta sıcaklıklı atık ısı kaynaklarından enerjinin geri kazanımı için kullanılmaktadır [11, 22,23]. Organik Rankine çevrimlerinde (ORC) çevrim akışkanı olarak düşük sıcaklıklarda kızgın buhar fazına geçebilen organik kökenli akışkanlar kullanılırken, Kalina çevrimlerinde çevrim akışkanı olarak amonyak-su karışımı

kullanılmaktadır. Kalina çevriminin şematik gösterimi Şekil 1’de verilmektedir.



**Şekil 1.** Egzoz gazının geri dönüşümünde kullanılan Kalina çevrimi (Kalina cycle for recovering of exhaust gas)

Kalina çevrimlerinde kullanılan amonyağ-su karışımının en önemli özelliği, değişken kaynama noktasına sahip olması, çevre dostu olması ve ucuz olmasıdır [15,24,25]. Çalışma kapsamında ele alınan çevrimde çevrim akışkanını kütleli olarak %86’sı amonyaktan oluşmaktadır. Oluşturulan bu karışım çevrimde öncelikle buharlaştırıcı üniteye gönderilmekte ve buhar fazına getirilmektedir (8→9). Bu esnada kombine ısı-güç sisteminden gelen 400 °C’deki egzoz gazı soğutulmuş bacasıya gönderilmekte ve atmosfere salınmaktadır (12→13). Buhar fazına gelen su-amonyaq karışımı içerisindeki buharlaşmamış su damlacıkları seperatör vasıtasıyla alınmaktadır (9→1-10). Buhar fazındaki karışım türbinden geçirilerek karışım odasına gönderilir (1→2). Bu esnada seperatörde buhar fazındaki karışımın ayrılan sıvı akışkan yüksek sıcaklıktaki ısı değiştiriciden geçirilerek fazla ısını buharlaştırıcıya giren amonyağ-su karışımına vermekte ve karışım odasına gönderilmektedir (10→11). Karışım odasında bir araya gelen karışım düşük sıcaklıklı ısı değiştiriciden geçirilerek yoğuşturucuya gönderilmektedir (3→4). Yoğuşturucuda soğutma suyu tarafından yoğuşan (14→15) amonyağ-su karışımı (4→5), sıkıştırılarak yüksek basınçlara çıkartılmak için pompaya gönderilmektedir (5→6).

Kombine güç sistemlerinde egzoz gazı atık ısısının geri kazanımı için tasarlanmış olan Kalina çevriminin tasarım ve analiz aşamalarında sistem ekipmanlarının birtakım termodinamik özellikleri sabit kabul edilmiştir. Kalina çevriminin tasarımında sabit kabul edilen tasarım parametreleri Çizelge 1’de verilmektedir.

**Çizelge 1.** Kalina çevriminin tasarımında sabit kabul edilen tasarım parametreleri (Design parameters considered constant in the design of Kalina cycle)

Giriş parametreleri	Değer	Birim
Türbin izentropik verim	87	%
Pompa izentropik verim	80	%
Amonyak-su oranı	86	%
Atmosfer sıcaklığı ( $T_0$ )	18	°C
Atmosfer basıncı ( $P_0$ )	1	bar
Ölü nokta entalpisi ( $h_0$ )*	1333,2347	kJ/kg
Ölü nokta entropisi ( $s_0$ )*	5,7370	kJ/kg-K
Soğutma suyu sıcaklığı	5	°C

## 2.1. Kalina çevriminde çalışma akışkanı olarak amonyağ-su karışımı kullanımı (Use of ammonia-water mixture as working fluid in Kalina cycle)

Amonyak-su karışımı Kalina çevrimini diğer çevrimlerden ayıran en önemli özelliklerden biridir. Amonyakın kaynama noktasının suyun kaynama noktasından düşük olmasından dolayı, amonyağ-su karışımı değişken bir kaynama noktasına sahip olmaktadır [26]. Geleneksel Rankine çevrimlerinde iş akışkanı olarak kullanılmakta olan saf suyun yüksek kaynama noktasına sahip olmasından dolayı ortaya çıkan bu dezavantaj amonyağ-su karışımı ile elimine edilmektedir. Böylece amonyağ-su karışımının çevrim akışkanı olarak kullanıldığı Kalina çevrimlerinin düşük ve orta sıcaklıklı atık ısı kaynaklarına entegre edilmesi ve bu atık ısının geri kazanılması mümkün hale gelmektedir. Buda yüksek ısı kaynağına ihtiyaç duyan saf su kullanılan geleneksel Rankine çevrimlerinin yüksek sıcaklık gereksinimlerini elimine etmekte ve Kalina çevrimlerini düşük ve orta sıcaklıklı ısı kaynaklarının enerji geri kazanımı için en uygun çevrimlerden birisi yapmaktadır. Geleneksel Rankine çevrimlerinin yanı sıra organik Rankine çevrimleri ile de kıyaslandığında Kalina çevrimlerinin birçok avantajı mevcuttur. Çünkü amonyağ-su karışımının organik akışkanlara göre birçok avantajı bulunmaktadır. Bu avantajlar;

- ❖ Doğaya ciddi zararlar verebilen organik akışkanlar ile kıyaslandığında doğanın bir yan ürünü olan amonyağın çevreye kayda değer bir zarar vermemesi,
- ❖ Amonyakın asidik kirlilikleri nötrleştirerek çevre tehditlerini azalması,
- ❖ Amonyakın yanma ve patlama tehlikesinin oldukça düşük olması ve güvenli bir akışkan olması,
- ❖ Çok pahalı olabilen Organik akışkanlar ile kıyaslandığında amonyağın daha ulaşılabilir ve ucuz olması,
- ❖ Amonyakın sabit kaynama ve yoğuşma sıcaklığı olmasına rağmen su ile karışığında

termodinamik özelliklerinin değişmesi ve farklı bir akışkan olarak davranması,

olarak sıralanabilir. Amonyak-su karışımındaki amonyak oranının ayarlanması sistemin güç üretim kapasitesini belirli bir değere kadar orantılı olarak arttırmaktadır. Optimum amonyak-su karışımı oranı tasarlanan sisteme ve kullanılan atık ısı kaynağına göre değişiklikler gösterebilmektedir. Bu nedenle optimum amonyak yüzdesinin bulunabilmesi için birçok optimizasyon çalışması yapılmıştır [27-30]. Optimizasyon çalışmalarında optimum amonyak yüzdesi, çevrimin maksimum verime ulaştığı anda karışım içinde bulunan amonyak miktarı ile bulunmaktadır. Mevcut çalışmada optimum amonyak-su karışımı oranı (%86) simülasyon programı tarafından hesaplanmış olup, çevrimin analizi bu oran için yapılmıştır.

### 3. MATEMATİKSEL METOT (MATHEMATICAL METHOD)

Kalina sistemini yalnızca termodinamiğin birinci kanunu ile analiz etmek yeterli olmayacaktır. Bu nedenle ikinci kanun analizinin de yapılması gerekmektedir [31-35]. Kalina çevriminin enerji ve ekserji analizi anlık olarak

şeklinde yazılabilmektedir. Burada  $\dot{Q}$ ,  $\dot{W}$  ve  $\dot{E}_x$  sırasıyla ısı, iş ve ekserji akışını ifade etmektedir. İkinci kanun analizi için kullanılmakta olan ekserji akışı ( $\dot{E}_x$ );

$$\dot{E}_x = \dot{m}\psi \quad (4)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada  $\psi$  özgül ekserjiyi ifade etmektedir. Özgül ekserji;

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (5)$$

denkleminde yararlanılarak bulunmaktadır. Burada  $T_0$  çevre sıcaklığını,  $s$  entropiyi,  $h$  ise entalpiyi temsil etmektedir. Tüm çevrimin enerji ve ekserji verimleri;

$$\eta_k = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_g} \quad (6)$$

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}_{x,g}} \quad (7)$$

formülleri ile bulunmaktadır. Kalina çevrimi için yapılan termodinamik analizler boyunca tüm hesaplamalar daimi akış şartları kabul edilerek yapılmıştır. Ayrıca, kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmiştir.

### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Çizelge 2. Kalina çevriminin hal nokta özellikleri (State point properties of Kalina cycle)

Boru	$P$	$T$	$h$	$\dot{m}$	$\dot{Q}$	$\rho$	$s$	$\psi$
	bar	°C	kJ/kg	kg/s	kW	kg/m <sup>3</sup>	kJ/kgK	kJ/kg
1	33,30	90,00	1710,543	0,36	613,13	23,268	5,552	463,633
2	6,60	14,66	1529,187	0,36	548,13	5,541	5,646	254,831
3	6,60	23,39	897,384	0,66	591,75	9,940	3,625	177,626
4	6,60	23,26	892,380	0,66	588,45	10,018	3,608	177,536
5	6,60	16,59	265,641	0,66	175,17	677,322	1,462	175,519
6	35,30	17,31	270,931	0,66	178,66	678,519	1,466	179,748
7	34,30	18,39	275,935	0,66	181,96	677,064	1,484	179,598
8	33,30	49,93	428,002	0,66	282,23	633,624	1,979	187,374
9	33,30	90,00	1148,033	0,66	757,04	41,572	4,027	311,164
10	33,30	90,00	478,117	0,30	143,90	658,007	2,212	129,479
11	32,30	22,39	144,949	0,30	43,63	745,311	1,198	91,338
12	1,00	400,00	424,643	1,63	692,17	0,534	7,612	149,212
13	1,00	130,00	133,353	1,63	217,37	0,892	7,060	18,464
14	2,00	5,00	21,218	18,74	397,58	1000,015	0,076	1,354
15	1,80	10,26	43,273	18,74	810,86	999,716	0,155	0,518

elde edilen veriler göz önünde bulundurularak yapılacaktır. Hesaplamalarda genel termodinamik denklemlerinden yararlanılmıştır [36-43]. Sürekli akışlı bir sistem için kütle, enerji ve ekserji denklemleri;

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (1)$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum \dot{m}_ç h_ç - \sum \dot{m}_g h_g \quad (2)$$

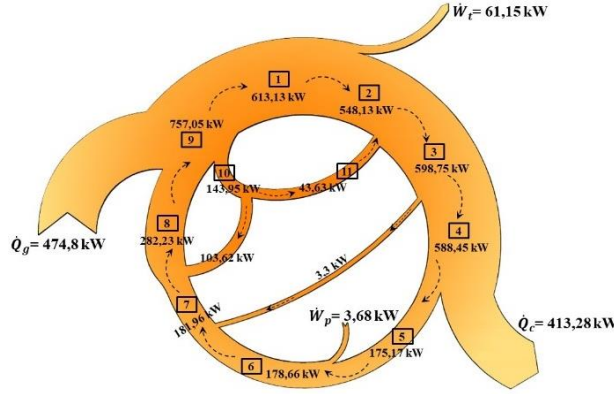
$$\dot{E}_{x,g} = \dot{E}_{x,ç} + \dot{E}_{x,y} \quad (3)$$

Çalışma kapsamında ısı-güç kombine çevriminde mevcut durumda 400 °C sıcaklıkta atmosfere atılmakta olan 1,63 kg/s kütleli debideki egzoz gazının atık enerjisinin geri kazanımı için bir Kalina çevrimi tasarlanmıştır. Tasarlanmış olan bu Kalina çevrimi Steag GbmH tarafından geliştirilen EBSILON®Professional programı kullanılarak optimize edilmiş ve optimum amonyak-su karışımı belirlenmiştir. Belirlenen optimum karışım oranı ve çevrim analizi boyunca sabit kabul edilen tüm tasarım parametreleri bir arada ele alınarak çevrimin



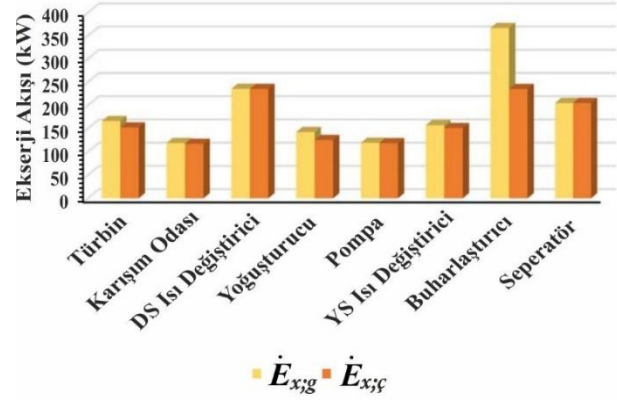
termodinamiksel analizi yapılmıştır. Programdan alınan ve çevrim üzerindeki her bir noktadan ölçülen akışkanın anlık termodinamik özellikleri Çizelge 2’de verilmektedir.

Bu çizelgede, Kalina çevrimi üzerinde termodinamik analiz için gerekli olan birçok önemli değerler verilmektedir. Kalina çevrimin optimizasyonu sonucu elde edilen bu termodinamik özellikler ışığında her bir ekipmandaki enerji akışı hesaplanarak Şekil 2’de verilmiştir.



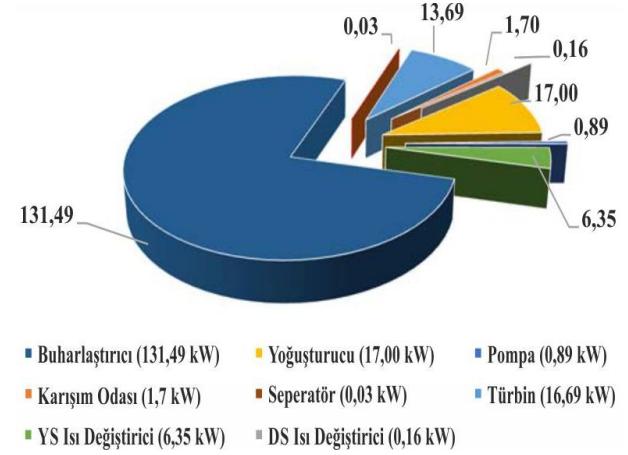
Şekil 2. Kalina çevrimindeki her bir ekipmandaki enerji akışı (Energy flow in each equipment in the Kalina cycle)

Kalina çevrimindeki her bir ekipmandaki enerji akışı güç üreten ve tüketen çevrim elemanları için (pompa ve türbin) üretilen ya da tüketilen işi ifade etmektedir. Isı değişiminin gerçekleştiği buharlaştırıcı ve ısı değiştirici gibi ekipmanlarda ise enerji akışı ekipman içerisinde bir akışkandan diğerine transfer edilen ısı miktarını ifade etmektedir. Ekipmanların her birindeki enerji akışı analiz edildiğinde, enerji akışının en büyük olduğu ekipmanın buharlaştırıcı olduğu görülmektedir. Çünkü, sisteme giren ve türbinde bir kısmı mekanik işe çevrilen ısı girişinin tamamı buharlaştırıcı üniteden çevrime girmektedir. En düşük enerji akışı ise sıcaklık farkının en düşük olduğu DS ısı değiştiricisinde ve pompada gerçekleşmektedir. Kalina çevrimi ekipmanlarındaki enerji akışının yanı sıra her bir ekipmandaki ekserji girişi ve ekserji çıkışı da hesaplanmış ve Şekil 3’de verilmiştir. Şekilde ekserji girişi sarı ve ekserji çıkışı turuncu sütunlar ile ifade edilmiştir. Karışım odası, seperatör, pompa ve DS ısı değiştiricisinde meydana gelen ekserji girişi ve çıkışları birbirine yakın iken buharlaştırıcıda giriş ve çıkış arasında kayda değer bir fark olduğu görülmektedir. Maksimum ekserji girişi 366,77 kW ile buharlaştırıcıda hesaplanırken minimum ekserji girişi 118,83 kW ile karışım odasında hesaplanmıştır. Sistemde maksimum ve minimum ekserji çıkışı ise sırasıyla 235,50 kW ile DS ısı değiştiricisinde ve 117,13 kW ile karışım odasındadır.



Şekil 3. Kalina çevrimindeki her bir ekipmandaki enerji akışı (Energy flow in each equipment in the Kalina cycle)

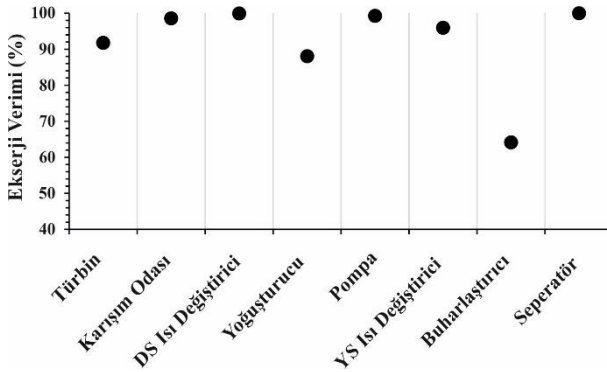
Ekserji dengesi denklemi ele alındığında, giren ve çıkan ekserji arasındaki farkın ekserji yıkımına eşit olduğu görülmektedir. Kalina çevrimi ekipmanlarının her biri için hesaplanan ekserji yıkımları Şekil 4’de verilmektedir.



Şekil 4. Kalina çevrimindeki her bir ekipmanın ekserji yıkımları (Exergy destruction of each equipment in the Kalina cycle)

Kalina çevrimi elemanlarındaki ekserji yıkımları detaylı olarak incelendiğinde maksimum ekserji yıkımının, giriş-çıkış sıcaklık farkının en yüksek olduğu buharlaştırıcı ekipmanında meydana geldiği görülmektedir. En düşük ekserji yıkımı ise seperatör ekipmanında meydana gelmiştir. Güneş enerji kaynağı destekli Kalina çevriminin ekserji analizi üzerine çalışan Mehrpooya ve ark. (2018), maksimum ekserji yıkımını buharlaştırıcıda hesaplamışlardır [44]. Aynı şekilde Fallah ve ark. (2016), tarafından yapılan jeotermal enerji kaynağı destekli Kalina çevriminin ileri ekserji analizi hesaplamaları sonucunda en büyük ekserji yıkımını yine buharlaştırıcıda bulmuşlardır [45]. Sistemdeki ekserji akışı ve ekserji yıkımlarının hesaplanması sistemin performansının incelenmesi için her ne kadar önemli parametrelerden olsa da tek başına yeterli değildir. Bu nedenle sistem ekipmanları üzerinde daha net bir kanıya varabilmek için ekipmanların ekserji verimlerinin

hesaplanması da büyük önem arz etmektedir. Kalina çevrimi sistem elemanları için hesaplanan ekserji verimleri Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5. Kalina çevrimindeki ekipmanların ekserji verimleri (Exergy efficiency of equipment in Kalina cycle)

Özellikle seperatör, DS ısı değiştiricisi, karışım odası ve pompa gibi ekipmanlarda ekserji verimi oldukça yüksek çıkmaktadır. Çünkü bu ekipmanların giriş ve çıkış sıcaklık değişimleri oldukça düşüktür. Analizlere göre en düşük ekserji verimi %64,4 ile buharlaştırıcıda ve en yüksek ekserji verimi %99,93 ile DS ısı değiştiricisinde hesaplanmıştır. Kalina çevrimi üzerine yapılan analiz çalışmalarını incelendiğinde, mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar ile örtüşen birçok çalışma bulunmaktadır. Mansoury ve ark. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, Kalina çevrimi ve ORC'nin kullanıldığı kombine bir sistemin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Bu çalışmada buharlaştırıcının ekserji veriminin yaklaşık %42 ile %47 aralığında olduğunu belirlemişlerdir [10]. Mehrpooya ve ark. (2018) düşük sıcaklıklı ısı geri kazanımı için tasarlanmış olan bir Kalina çevriminin ekserji analizi üzerine çalışmışlardır. Çalışma sonucunda, Seperatör ve türbinin ekserji verimlerini sırasıyla %99,67 ve %89,81 olarak bulmuşlardır [44]. Çevrim elemanları ve çevrim performans parametreleri bir arada ele alındığında, tüm sistemin genel durumu üzerine bir öngörüye sahip olabilmek için çevrimin genel enerji ve ekserji hesaplamalarının yapılması gerekli ve önemli bir adımdır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında tasarlanmış olan Kalina çevriminin performans parametreleri, enerji ve ekserji verimleri de hesaplanmış ve Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Kalina çevriminin performans verileri (Kalina cycle performance data)

$\dot{W}_t$	$\dot{Q}_g$	$\dot{W}_p$	$E_{x,g}$	$\dot{W}_{net}$	$\eta_k$	$\varepsilon_k$
kW	kW	kW	kW	kW	%	%
61,1	474,8	3,677	213,1	57,4	12,1	26,9

Kalina çevriminin performans analizi yapılırken jeneratörden çıkan güç brüt güç olarak alınmış ve net gücün hesaplanmasında bu brüt gücün çevrim içerisinde karışımın basınçlandırılmasında kullanılan pompanın

tükettiği güç çıkarılmıştır. Kalina çevriminin performans verileri incelendiğinde egzoz gazının atık ısısının geri kazanımından yaklaşık 58 kW net güç üretimi elde edilmektedir. Çevrimin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla yaklaşık %12 ve %27 olarak hesaplanmıştır. ORC ve Kalina çevrimlerinin termodinamik analizlerinin yapılarak karşılaştırıldığı birçok çalışma mevcuttur. Bu iki çevrimin analizlerinin yapılarak kıyaslandığı bir çalışmada çevrim akışkanı olarak %90 amonyak-su karışımının kullanıldığı ve 43,48 bar türbin giriş basıncının olduğu Kalina çevrimi için maksimum enerji ve ekserji verimleri sırasıyla yaklaşık %9,5 ve %21 olarak hesaplanmıştır [46]. Diğer bir çalışmada ise Kalina çevriminin termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu yönünden optimizasyon çalışması yapılmış ve sistemin enerji verimi yaklaşık %12,95 olarak bulunmuştur [22]. Dahası bu çalışmalar ve literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilen sonuçlar mevcut çalışma sonuçları ile kıyaslandığında elde edilen sonuçların birbirileri ile aynı doğrultuda olduğu görülmüştür.

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Düşük sıcaklıklı enerji kaynaklarından geleneksel enerji üretim yöntemlerini kullanarak enerji geri dönüşümü oldukça güç ve oldukça maliyetli olmaktadır. Bu nedenle bu atık ısılardan geri kazanımı için çoğunlukla bu sistemlere ORC çevrimleri entegre edilmektedir. Fakat, bazı organik akışkanların doğaya zararlı olması, bu akışkanların elde edilebilmesinin zorluğu ve ozon tabakasına olan zararı enerjinin geri kazanımı için, yeni bir sistem olan Kalina çevrimlerine yönelimi arttırmıştır.

Kalina çevrimlerini ORC'den ayıran en önemli özelliği çalışma akışkanı olarak amonyak-su karışımı kullanılmasıdır. Küresel ısınma ve hava kirliliği gibi bir yan etkisi bulunmayan ve ayrıca kolay ulaşılabilir olmasından dolayı oldukça dikkat çekmektedir. Asidik kirlilikleri nötrleştirerek çevre tehditleri azaltması diğer dikkat çekici bir özelliğidir. Kalina çevriminin verimi birçok ORC sisteminden daha iyi olduğu araştırmalar sonucunda ortaya çıkmıştır.

Kalina çevrimi üzerine yapılmış olan mevcut çalışmada, ekserji yıkımının giriş-çıkış sıcaklık farkının en yüksek olduğu buharlaştırıcı ekipmanında en büyük olduğu görülmüştür. Buharlaştırıcı ekipmanında ekserji yıkımı 131,49 kW olarak hesaplanırken, çevrimin diğer ekipmanlarında kayda değer bir yıkımın olmadığı görülmüştür. Ayrıca, ekipmanların ekserji verimleri incelendiğinde, minimum ekserji verimi %64,4 ile buharlaştırıcıda hesaplanmıştır. Çevrimin diğer ekipmanlarında ise oldukça düşük giriş-çıkış sıcaklık değişimi olduğundan yüksek ekserji verimine sahip oldukları anlaşılmıştır. Mevcut durumda kullanılmadan atmosfere salınan egzoz gazının atık enerjisinin Kalina çevrimi kullanılarak geri kazanılması durumunda yaklaşık 58 kW net güç elde edilebileceği görülmüştür. Dahası, Kalina sisteminin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %12,1 ve %26,97 olarak hesaplanmıştır.

### Kısaltmalar

$c_p$	= özgül ısı ( $kJ/kgK$ )
$\dot{E}_x$	= ekserji akışı ( $kW$ )
$h$	= entalpi ( $kJ/kg$ )
$\dot{m}$	= kütleli debi ( $kg/s$ )
$P$	= basınç ( $bar$ )
$\dot{Q}$	= ısı akışı ( $kW$ )
$s$	= entropi ( $kJ/kgK$ )
$T$	= sıcaklık ( $K$ )
$T_0$	= çevre sıcaklığı ( $K$ )
$\dot{W}$	= güç ( $kW$ )
$v$	= özgül hacim ( $m^3/kg$ )

### Simgeler

$\rho$	= yoğunluk ( $kg/m^3$ )
$\psi$	= özgül ekserji ( $kJ/kg$ )
$\varepsilon$	= ekserji verimi (%)
$\eta$	= enerji verimi (%)

### Alt İndisler

$c$	= kondenser
$t$	= türbin
$p$	= pompa
$g$	= giriş
$\zeta$	= çıkış
$k$	= kalina
$y$	= yıkım

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bose, B.K., "Global warming: Energy, environmental pollution, and the impact of power electronics". *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 4(1): 6-17, (2010).
- [2] Tanç, B., Arat, H.T., Baltacıoğlu, E. and Aydın, K., "Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles". *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(20): 10120-10128, (2019).
- [3] Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y. and Uğurlu, İ., "Dünyada ve Türkiye'de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi". *Engineer & the Machinery Magazine*, 59(692): 86-114, (2018).
- [4] Zhang, X., He, M., and Zhang, Y., "A review of research on the Kalina cycle". *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(7): 5309-5318, (2012).
- [5] Sözen, A., Alp, I. and İskender, Ü., "An evaluation of Turkey's energy dependency". *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 9(4): 398-412, (2014).
- [6] Kuyumcu, M.E., Tutumlu, H. and Yumrutaş, R., "Performance of a swimming pool heating system by utilizing waste energy rejected from an ice rink with an energy storage tank". *Energy conversion and management*, 121: 349-357, (2016).
- [7] Sözen, A., Cakir, M. T. and Cıvil, F., "Sectoral CO2 emission reductions in Turkey: Preparing for DOHA 2020". *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(7): 905-913, (2016).
- [8] Tutumlu, H., Yumrutaş, R. and Yildirim, M., "Investigating thermal performance of an ice rink cooling system with an underground thermal storage tank". *Energy Exploration & Exploitation*, 36(2): 314-334, (2018).
- [9] Hames, Y., Kaya, K., Baltacıoğlu, E. and Turksoy, A., "Analysis of the control strategies for fuel saving in the hydrogen fuel cell vehicles". *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(23): 10810-10821, (2018).
- [10] Mansoury, M., Jafarmadar, S. and Khalilarya, S., "Energy and exergy analyses of a combined cycle Kalina and organic Rankine cycles using waste heat". *International Journal of Exergy*, 27(2): 251-286, (2018).
- [11] Júnior, E.P.B., Arrieta, M.D.P., Arrieta, F.R.P. and Silva, C.H.F., "Assessment of a Kalina cycle for waste heat recovery in the cement industry". *Applied Thermal Engineering*, 147: 421-437, (2019).
- [12] Chen, Y., Guo, Z., Wu, J., Zhang, Z. and Hua, J., "Energy and exergy analysis of integrated system of ammonia-water Kalina-Rankine cycle". *Energy*, 90: 2028-2037, (2015).
- [13] Rostamzadeh, H., Ebadollahi, M., Ghaebi, H. and Shokri, A., "Comparative study of two novel micro-CCHP systems based on organic Rankine cycle and Kalina cycle". *Energy Conversion and Management*, 183: 210-229, (2019).
- [14] Prananto, L. A., Zaini, I.N., Mahendranata, B.I., Juangsa, F.B., Aziz, M. and Soelaiman, T.A.F., "Use of the Kalina cycle as a bottoming cycle in a geothermal power plant: Case study of the Wayang Windu geothermal power plant". *Applied Thermal Engineering*, 132: 686-696, (2018).
- [15] Ogriseck, S., "Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study". *Applied Thermal Engineering*, 29(14-15): 2843-2848, (2009).
- [16] Zare, V. and Mahmoudi, S.M.S., "A thermodynamic comparison between organic Rankine and Kalina cycles for waste heat recovery from the Gas Turbine-Modular Helium Reactor". *Energy*, 79: 398-406, (2015).
- [17] Ibrahim, M.B. and Kovach, R.M., "A Kalina cycle application for power generation". *Energy*, 18(9): 961-969, (1993).
- [18] Ganesh, N.S. and Srinivas, T., "Nuclear energy-driven Kalina cycle system suitable for Indian climatic conditions". *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(3): 298-308, (2019).
- [19] Rodríguez, C.E.C., Palacio, J.C.E., Venturini, O.J., Lora, E.E.S., Cobas, V.M., dos Santos, D.M. and Gialluca, V., "Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low temperature enhanced geothermal system in Brazil". *Applied Thermal Engineering*, 52(1): 109-119, (2013).
- [20] Bombarda, P., Invernizzi, C.M. and Pietra, C., "Heat recovery from Diesel engines: A thermodynamic comparison between Kalina and ORC cycles". *Applied thermal engineering*, 30(2-3): 212-219, (2010).
- [21] Nemati, A., Nami, H., Ranjbar, F. and Yari, M., "A comparative thermodynamic analysis of ORC and Kalina cycles for waste heat recovery: a case study for CGAM cogeneration system". *Case Studies in Thermal Engineering*, 9: 1-13, (2017).
- [22] Singh, O.K. and Kaushik, S.C., "Energy and exergy analysis and optimization of Kalina cycle coupled with a coal fired steam power plant". *Applied thermal engineering*, 51(1-2): 787-800, (2013).
- [23] Bilgiç, H.H., Yağlı, H., Ali, K. and Yapıcı, A., "Deneysel

- bir organik Rankine çevriminde yapay sinir ağları (YSA) yardımıyla güç tahmini". *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(1): 7-17, (2016).
- [24] Mirolli, M.D. "The Kalina cycle for cement kiln waste heat recovery power plants". *In Conference Record Cement Industry Technical Conference*, Kansas City, 330-336, (2005).
- [25] Mirolli, M.D. "Ammonia-water based thermal conversion technology: Applications in waste heat recovery for the cement industry". *In Conference Record Cement Industry Technical Conference*, Charleston, 234-241, (2007).
- [26] Koc, A., Bulgan, A.T. and Öztürk, N.A., "Design and analysis of a water-ammonia absorption refrigeration system". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 214(5): 449-454, (2000).
- [27] Kalina, A.I., "Combined-cycle system with novel bottoming cycle". *Journal of engineering for gas turbines and power*, 106(4): 737-742, (1984).
- [28] Usvika, R., Rifaldi, M. and Noor, A., "Energy and exergy analysis of kalina cycle system (KCS) 34 with mass fraction ammonia-water mixture variation". *Journal of mechanical science and technology*, 23(7): 1871-1876, (2009).
- [29] El-Sayed, Y.M. and Tribus, M., "A theoretical comparison of the Rankine and Kalina cycles". *In Proceedings of analysis of energy systems, design and operation, presented at the winter annual meeting of the American Society of Mechanical Engineers*, Miami Beach, 97-105, (1985).
- [30] Kurt, Ö.F. and Abuşoğlu, A., "Biyogaz Motorlu bir Birleşik Isı ve Güç Üretim Sisteminin Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyonu". *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 4(1): 109-116, (2019).
- [31] Yağlı, H., Karakuş, C., Koç, Y., Çevik, M., Uğurlu, İ. and Koç, A., "Designing and exergetic analysis of a solar power tower system for Iskenderun region". *International Journal of Exergy*, 28(1): 96-112, (2019).
- [32] Koç, Y., Yağlı, H. and Koç, A., "Exergy Analysis and Performance Improvement of a Subcritical/Supercritical Organic Rankine Cycle (ORC) for Exhaust Gas Waste Heat Recovery in a Biogas Fuelled Combined Heat and Power (CHP) Engine Through the Use of Regeneration". *Energies*, 12(4): 575-596, (2019).
- [33] Yağlı, H., "Basit ve rejeneratif organik rankine çevrimi (ORC) tasarımları kullanılarak biyogaz yakıtlı ısı-güç kombine (CHP) motorunun atık ısısının geri dönüştürülebilirliği, enerji ve ekserji analizi". *Doktora Tezi*, İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, (2018).
- [34] Koc, Y., Kose, O., and Yagli, H., "Exergy Analysis of a Natural Gas Fuelled Gas Turbine Based Cogeneration Cycle". *International Journal of Exergy, In Print*.
- [35] Bademlioglu, A.H., Yamankaradeniz, R. and Kaynakli, O., "Exergy Analysis of the Organic Rankine Cycle Based on the Pinch Point Temperature Difference". *Journal of Thermal Engineering*, 5(3): 157-165, (2019).
- [36] Özdemir, M.B. and Özkaya, M.G., "Ankara İli Şartlarında Düşey Tip Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Enerji ve Ekserji Analizi". *Politeknik Dergisi*, 18(4): 269-280, (2015).
- [37] Abusoglu, A. and Kanoglu, M., "First and second law analysis of diesel engine powered cogeneration systems". *Energy Conversion and Management*, 49(8): 2026-2031, (2008).
- [38] Abusoglu, A. and Kanoglu, M., "Exergetic and thermoeconomic analyses of diesel engine powered cogeneration: Part 1 – Formulations". *Applied Thermal Engineering*, 29(2-3): 234-241, (2009).
- [39] Kanoglu, M. and Dincer, I., "Performance assessment of cogeneration plants". *Energy Conversion and Management*, 50(1): 6-81, (2009).
- [40] Yagli, H., Koc, A., Karakus, C. and Koc, Y., "Comparison of toluene and cyclohexane as a working fluid of an organic Rankine cycle used for reheat furnace waste heat recovery". *International Journal of Exergy*, 19(3): 420-438, (2016).
- [41] Yilmaz, C., Kanoglu, M. and Abusoglu, A., "Exergetic cost evaluation of hydrogen production powered by combined flash-binary geothermal power plant". *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(40): 14021-14030, (2015).
- [42] Yağlı, H., Koç, Y., Koç, A., Görgülü, A. and Tandiroğlu, A., "Parametric optimization and exergetic analysis comparison of subcritical and supercritical organic Rankine cycle (ORC) for biogas fuelled combined heat and power (CHP) engine exhaust gas waste heat". *Energy*, 111: 923-932, (2016).
- [43] Kahraman, N., Cengel, Y.A., Wood, B. and Cerci, Y., "Exergy analysis of a combined RO, NF, and EDR desalination plant". *Desalination*, 171(3): 217-232, (2005).
- [44] Mehroooya, M. and Mousavi, S.A., "Advanced exergoeconomic assessment of a solar-driven Kalina cycle". *Energy Conversion and Management*, 178: 78-91, (2018).
- [45] Fallah, M., Mahmoudi, S.M.S., Yari, M. and Ghiasi, R.A., "Advanced exergy analysis of the Kalina cycle applied for low temperature enhanced geothermal system". *Energy conversion and management*, 108: 190-201, (2016).
- [46] Yari, M., Mehr, A.S., Zare, V., Mahmoudi, S.M.S. and Rosen, M.A., "Exergoeconomic comparison of TLC (trilateral Rankine cycle), ORC (organic Rankine cycle) and Kalina cycle using a low grade heat source". *Energy*, 83: 712-722, (2015).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Fuzzy applications of FUCOM method in manufacturing environment

## *Üretim ortamında FUCOM yönteminin bulanık uygulamaları*

*Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet Alper SOFUOĞLU*

*ORCID: 0000-0003-4681-6390*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Sofuoğlu M.A., “Fuzzy applications of FUCOM method in manufacturing environment”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 189-195, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.586036

# Üretim Ortamında FUCOM Yönteminin Bulanık Uygulamaları

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Mehmet Alper SOFUOĞLU\***

Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 04.07.2019 ; Kabul/Accepted : 17.09.2019)

## ÖZ

Geleneksel üretim yöntemleri yeni geliştirilen yüksek dayanımlı, hassas / kırılgan ve karmaşık şekilli parçaların işlenmesinde sınırlıdır. Bu tür parçaları işlemek için konvansiyonel olmayan üretim yöntemleri gereklidir. İş parçası için en uygun üretim yöntemini seçmek hayati bir karar verme problemidir ve bu problemin çözümü günümüz üreticileri için çok önemlidir. Bu çalışmada, üç farklı FUCOM metodu bulanık TOPSIS ve bulanık WASPAS teknikleri ile birleştirildi. Bu geliştirilen yöntemleri test etmek için literatürden geleneksel olmayan imalat yöntemlerinin seçimi bir vaka çalışması olarak alınmıştır. Modelin başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** FUCOM, WASPAS, geleneksel olmayan üretim yöntemi, bulanık ÇKKV.

## Fuzzy Applications of FUCOM Method in Manufacturing Environment

### ABSTRACT

Conventional manufacturing methods are limited in the machining of newly developed high strength, precision / brittle and complex shaped parts. Non-conventional manufacturing methods are required to machine such parts. Choosing the most suitable manufacturing method for the part is a vital decision-making problem and the solution of this problem is very important for today's manufacturers. In this study, three different Full Consistency Method (FUCOM) methods were combined with fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution method (fuzzy TOPSIS) and fuzzy weighted aggregated sum product assessment (fuzzy WASPAS) techniques. In order to test these developed methods, the selection of non-traditional manufacturing methods from the literature was taken as a case study. It is seen that the model produced successful results.

**Keywords:** FUCOM, WASPAS, nontraditional manufacturing method, fuzzy MCDM.

### 1. INTRODUCTION

One of the most important problems encountered in decision-making (DM) problems is the determination of criteria weights. In this context, many studies have been carried out in the literature. The researchers [1–4] agreed that weights of criteria change in terms of different models. In addition, there is no agreement on what the best method is. However, specific methods produce better results. Some authors classified the models into subjective and objective models [5,6].

Several authors applied various mathematical techniques and proposed specialized expert systems to choose appropriate non-traditional machining processes from the available options for various machining operations. Madic et al. [7] studied the feasibility of Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis (MOORA) and Analytic Hierarchy Process (AHP) methods and they compared the results with the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution method (TOPSIS). Khandekar and Chakraborty [8] used fuzzy axiomatic design principles. Roy et al. [9] studied a novel way with hybridizing fuzzy AHP with Quality function

deployment (QFD). Boral and Chakraborty [10] used the case-based reasoning (CBR) approach

Fuzzy multi-criteria decision-making models are selected to sort different options according to predetermined criteria with a single decision-maker or through group decision-making; it is foreseen that the alternatives' suitability against the criteria and the importance weights of the criteria can be evaluated using linguistic values indicated by fuzzy numbers [11]. Different approaches have been developed to solve fuzzy multi-criteria decision-making problems [11-15]. Abdullah [16] presented a brief review of the category in fuzzy multi-criteria decision-making. Several real-life applications were presented in the study. Fuzzy set theory has been improved by new fuzzy type sets. These are type 2 fuzzy sets and type n fuzzy sets containing uncertainty about the membership function [12]. The Intuitionistic fuzzy sets presented by Atanassov [17] extend the fuzzy sets to an additional degree called the degree of uncertainty. Also, Hesitant approach has been used in different studies in the literature [18-21].

Fuzzy TOPSIS based researches can be divided into three groups. Several researchers developed new fuzzy TOPSIS methods or changes past methods. Ye and Li [23] developed the TOPSIS technique via probability

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : asofuoglu@ogu.edu.tr

theory. Fuzzy triangular numbers were used for the evaluation. Hero et al. [24] developed the fuzzy hierarchical TOPSIS method for multi-criteria evaluation of industrial robotic systems. Chen and Wei [25] improved the methodology of Chen and Hwang [22] and explained the degree of each option and the weight of each criterion in linguistic terms that can be expressed in fuzzy triangular numbers. Kannan et al. [26] used the fuzzy TOPSIS method to rank green suppliers of a Brazilian electronics company. Wang [27] evaluated the financial performance of Taiwanese container transport companies via fuzzy TOPSIS. Chu [28] used the fuzzy TOPSIS technique to solve the site location problem. Mandic et al. [29] developed an integrated fuzzy multi-criteria model to assess the financial performance of banks. Fuzzy AHP was used to evaluate weights. A fuzzy TOPSIS technique was used in the evaluation of banks. Zhang and Lu [30] developed an integrated fuzzy group decision-making technique to handle the uncertainty of decision-makers' preferences. Decision-makers used fuzzy triangular numbers. Tsaura et al. [31] used a mixed-method to determine the quality of service to the airline. AHP was used to obtain criterion weights and TOPSIS method was used for ranking.

Efficient use of machining and machine tool data are important for manufacturing companies. Therefore, the use of machine learning in production is of increasing interest. However, it is still at the beginning of growth potential and is currently being used less in the machining sector [32-34].

Conventional manufacturing methods are limited in the processing of newly developed high strength, precision / brittle and complex shaped parts. Non-conventional manufacturing methods are required to process such parts. Choosing the most suitable manufacturing method for the part we will process is a significant decision-making problem and the solution of this problem is very important for today's manufacturers. The Full Consistency Method (FUCOM) method is a new technique used to weigh criteria in the literature. This technique is a semi-objective / objective evaluation method, which reduces the comparison of criteria within each other, and optimizes the criteria weights with the optimization algorithm with few comparisons. In this study, three different FUCOM methods were combined with fuzzy TOPSIS and fuzzy weighted aggregated sum product assessment (WASPAS) techniques. In order to test these developed methods, the selection of non-traditional manufacturing methods from the literature was taken as an example problem. In the second part of the study, the techniques used are explained. In the third part of the study, the problem of choosing a non-traditional manufacturing method is explained. In the following sections, the results are discussed.

## 2. MATERIAL and METHOD

### 2.1. Fuzzy TOPSIS Model

Chen developed a fuzzy TOPSIS algorithm. The steps are explained below [35]:

#### 2.1.1. Specify the decision matrix

The decision-making matrix is given in Eqs.1-2:

$$D = [\tilde{x}_{ij}] \tag{1}$$

$$\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}) \tag{2}$$

$x_{ij}$  elements show  $i$ th decision-making points according to the  $j$ th evaluation criteria. Triangular fuzzy numbers describe these linguistic variables,  $n$  shows the number of criteria and  $m$  represents the number of alternatives ( $j=1,2,3\dots n$  and  $i=1,2,3\dots m$ ).

#### 2.1.2. Calculate the standard decision matrix

The normalized fuzzy decision matrix is denoted by  $R = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n}$ . Standard decision-making matrix is computed by using the decision-making matrix as follows (Eqs.3-4).  $B$  and  $C$  are benefit and cost criteria, respectively.

$$\tilde{r}_{ij} = \frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \cdot c_j^* = \max c_{ij} \text{ if } j \in B \tag{3}$$

$$\tilde{r}_{ij} = \frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \cdot a_j^- = \min a_{ij} \text{ if } j \in C \tag{4}$$

Standard decision-making matrix is given below (Eq.5):

$$R_{ij} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \tag{5}$$

#### 2.1.3. Calculate the weighted decision matrix

In this step, the standard decision-making matrix is multiplied by the weights ( $w_j$ ), and weighted decision-making matrix ( $V_{ij}$ ) is obtained (Eqs.6-7).

$$V_{ij} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \tag{6}$$

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij}(\cdot)w_j \tag{7}$$

#### 2.1.4. Calculate the ideal and negative ideal solutions

The ideal solution set is computed using Eqs.8-9.

$$A^* = (\tilde{v}_1^*, \tilde{v}_2^* \dots \tilde{v}_n^*) \tag{8}$$

The negative ideal solution set is computed using the

$$\tilde{v}_j^* = (1,1,1) \tag{9}$$

equations (Eqs.10-11):

$$A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^- \dots \tilde{v}_n^-) \tag{10}$$

$$\tilde{v}_j^- = (0,0,0) \tag{11}$$

**2.1.5. Calculate the distinction measure**

The calculation of ideal distinction ( $S_i^*$ ) measure and negative ideal distinction measure ( $S_i^-$ ) is given in Eqs.12-13.

$$S_i^* = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^*) \tag{12}$$

$$S_i^- = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \tag{13}$$

**2.1.6. Calculate the proximity values relative to the ideal solution**

Ideal and negative ideal distinction measures are used to find proximity values (Eq.14):

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \tag{14}$$

**2.2. Fuzzy WASPAS**

The calculation steps are given below [36]:

Step-1 Define the decision matrix: The decision-making matrix is given in Eqs.15-16:

$$\tilde{X} = [\tilde{x}_{ij}] \tag{15}$$

$$\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}) \tag{16}$$

$x_{ij}$  elements show ith decision-making points according to the jth evaluation criteria. Triangular fuzzy numbers

describe these linguistic variables, n shows the number of criteria and m represents the number of alternatives ( $j=1,2,3\dots n$  and  $i=1,2,3\dots m$ ).

Step-2: Normalization of  $\tilde{X}$  decision matrix

Step-3: Calculation of the weighted decision matrix  $\tilde{X}_q$  for the Weighted Sum Model (WSM),  $\tilde{X}_p$  for the Weighted Product Model (WPM).

Step-4: Calculation of optimality function values for WSM and WPM in Eq.17 and 18, respectively.

$$\tilde{Q}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{x}_{ij} \tag{17} \text{ i=1 to m.}$$

$$\tilde{P}_i = \prod_{j=1}^n \tilde{x}_{ij} \tag{18} \text{ i=1 to m.}$$

For defuzzification, the center-of-area can be applied (Eqs. 19-20).

$$Q_i = \frac{1}{3}(Q_{i\alpha} + Q_{i\beta} + Q_{i\delta}) \tag{19}$$

$$P_i = \frac{1}{3}(P_{i\alpha} + P_{i\beta} + P_{i\delta}) \tag{20}$$

Step-5: Calculation of the integrated utility function value ( $K_i$ ).

$$K_i = \lambda \sum_{j=1}^m Q_i + (1 - \lambda) \sum_{j=1}^m P_i \tag{21}$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^m P_i}{\sum_{i=1}^m Q_i + \sum_{i=1}^m P_i} \tag{22}$$

Step-6: Selection an alternative with maximal  $K_i$  value

**2.3. Full Consistency Method (FUCOM)**

FUCOM reduces the likelihood of an error due to the following: (1) few comparisons and (2) defined restrictions when calculating optimal values of criteria. FUCOM calculates the error value of the weight vectors to validate the model. However, to determine the weights of the criteria for the other models (Best Worst Method (BWM), AHP models), the two-way comparison appears to be high, while FUCOM eliminates this problem [37]. The model is given below (Eqs. 23-26):

$$\begin{aligned} \min X \\ \text{s.t.} \end{aligned}$$

$$\left| \frac{w_j^{(k)}}{w_{j(k+1)}} - \varphi_{k/(k+1)} \right| \leq X \quad \forall_j \tag{23}$$

$$\left| \frac{w_j^{(k)}}{w_{j(k+2)}} - \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} \right| \leq X \quad \forall_j \tag{24}$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad \forall_j \tag{25}$$

$$w_j \geq 0 \quad \forall_j \tag{26}$$

$X$  shows the consistency,  $\varphi_{k/(k+1)}$  is the comparative priority among the observed criteria. The steps are given below:



1. Criteria are ranked from the highest importance to the lowest.
2. Comparison of the ranked criteria is performed, and the comparative priority is determined.
3. The final weights are calculated using formulas 23-26.

Using the same procedure of Best-Worst method, FUCOM linear and FUCOM euclidean were proposed in this study. More information is given in the reference study [37].

### 2.4. Steps of the Proposed Method

The steps of the proposed model give more details about the proposed method (Fig. 1). A novel hybrid approach was used.

Step 1. Define criteria/alternative matrix.
Step 2. Calculate criteria weights using FUCOM methods (FUCOM linear/non-linear and euclidean)
Step 3. Apply fuzzy TOPSIS/WASPAS methods using criteria weights calculated in Step 2.
Step 4. Compare the results with Spearman Correlation Test.

**Figure 1.** The steps of the proposed model.

In this study, non-conventional machining methods selection problem was used to test the proposed method. This problem includes seven different criteria and nine different methods (Step 1). Seven criteria weights were calculated by FUCOM technique. In the criteria scoring stage, a study in the literature was used [38] (Step 2). Then, nine different methods were ranked using fuzzy TOPSIS/WASPAS method. Triangular fuzzy numbers were used (Table A.1.). Performances of quantitative criteria are described as triangular fuzzy number (l, m, u). Lower limit, average and upper limit values are expressed as follows (Step 3):

Lower Limit (L): It means the process values obtained in cases where the process is applied in unfavorable conditions.

Average (M): Process values given by the process in general. It can also be expressed as application values.

Upper limit (U): Process values obtained by experienced users in very favorable conditions.

The ranking results were compared with Spearman Test (Step 4).

### 3. CASE STUDY

A case study was taken from the literature study [38]. The detailed explanation of the problems is given in these study Abbreviations are provided in Table 1 for non-traditional machining processes. The case study is given in Table A.1.

**Table 1.** Abbreviation of the non-conventional machining methods

<b>AJM</b>	Abrasive jet machining
<b>USM</b>	Ultrasonic machining
<b>ECM</b>	Electrochemical machining
<b>EDM</b>	Electrical discharge machining
<b>EBM</b>	Electron beam machining
<b>LBM</b>	Laser beam machining
<b>CHM</b>	Chemical machining
<b>AWJM</b>	Abrasive waterjet machining
<b>RUSM</b>	Rotary ultrasonic machining

Drilling operation is carried out for of the turbine engine combustion chamber. Generally, the EBM method is used. Process-related requirements are given below.

Workpiece material: Superalloy.

Formal Competence: Hole Drilling Process.

Qualification: Diameter D = 0.9 mm, Tolerance 0.05mm, L / D = 1.22.

### 4. RESULTS AND DISCUSSION

Comparison of the best and worst criteria according to the other criteria are given in Table 2 for the case study. According to the case study (Table A.1.), the cost is chosen as the best criterion, whereas surface damage is selected as the worst criterion. Based on Kulu et al.'s [38] study, the criteria are scored.

**Table 2.** Pairwise comparison of case study

	S. finish	S. damage	Taper	MRR	WM	Cost
<b>Worst criterion: Surface damage</b>	0.5	1	1	0.33	0.25	0.14
<b>Best criterion: Cost</b>	5	7	3	2	3	1

The criteria weights of the case are presented in Tables 3-4 in terms of different FUCOM techniques. The cost has the highest criterion weight while surface finish, surface damage and taper have the lower criteria weights in terms of three different FUCOM methods.

**Table 3.** Criteria weights of FUCOM method (Euclidean and Non-linear)

Criteria	Weights/Obj.function
(s.finish-s.damage-taper-MRR-WM-cost)	0.059,0.059,0.059,0.235,0.118,0.47 /5.54e-7

**Table 4.** Criteria weights of FUCOM method (Linear)

Criteria	Weights/Obj.function
(s.finish-s.damage-taper-MRR-WM-cost)	0.07,0.06,0.04,0.26,0.11,0.46 /0.88

The ranking results are given in Table 5. Spearman correlation test was performed with the literature results [38]. Fuzzy TOPSIS linear and WASPAS are used during the calculation. Electrochemical machining is the best method in terms of all results. According to Spearman correlation test, the results were significant at 5% level. The rankings are nearly the same.

**Table 5.** Proposed methods and their rankings with Spearman correlation test

Proposed methods	Rankings	Spearman correlation (coefficient(r)and p) [38]
Fuzzy TOPSIS linear/FUCOM nonlinear	6-4-1-7-2-8-9-5-3	0.75/0.02
Fuzzy WASPAS/FUCOM nonlinear	6-5-1-7-2-8-9-3-4	0.867/0.002
Fuzzy TOPSIS linear/FUCOM euclidean	6-4-1-7-2-8-9-5-3	0.75/0.02
Fuzzy WASPAS/FUCOM euclidean	6-5-1-7-2-8-9-3-4	0.867/0.002
Fuzzy TOPSIS linear/FUCOM linear	6-4-1-7-2-8-9-5-3	0.75/0.02
Fuzzy WASPAS/FUCOM linear	6-5-1-7-2-8-9-3-4	0.867/0.002
Fuzzy AHP+TOPSIS [38]	4-6-1-9-3-8-7-2-5	-

In this study, a highly flexible method is proposed for decision-makers by hybridizing a semi-objective method with fuzzy numbers. In terms of sensitivity analysis, three different weighting techniques and two different ranking techniques were used and the study produced successful results. It can be said to be superior compared to the methods in the literature. The results of the study are consistent with each other and with the literature studies.

## 5. CONCLUSIONS

Conventional manufacturing methods are limited in the machining of newly developed high strength, precision / brittle and complex shaped parts. Therefore, non-conventional production methods are required to process such parts. Selection of the most suitable production method for the workpiece is a vital decision-making problem and the solution of this problem is very important for manufacturers. In this study, a new hybrid decision-making approach which has not been used in literature before was proposed. This newly developed approach has been applied to the problem of non-traditional manufacturing method selection. The FUCOM method is a semi-subjective method, which makes it easier to calculate criteria weights than other methods. Different FUCOM methods were combined with fuzzy TOPSIS and fuzzy WASPAS methods. The results of the study were compared with the Spearman correlation test. According to the test, the rankings at the 5% significance are the same. The newly developed model has produced successful results. In future studies, FUCOM technique can be used with different multi-criteria decision-making techniques. In addition, the developed approach can be tried for different case studies.

## REFERENCES

- [1] Roberts, R. and Goodwin, P., "Weight approximations in multi-attribute decision models", *J. Multicrit. Decis. Anal.*, 11: 291–303, (2002).
- [2] Solymosi, T. and Dompfi, J., "Method for determining the weights of criteria: The centralized weights", *Eur. J. Oper. Res.*, 26: 35–41, (1985).
- [3] Cook, W.D. "Distance-based and ad hoc consensus models in ordinal preference ranking". *Eur. J. Oper. Res.*, 172: 369–385, (2006).
- [4] Weber, M. Borcherding, K., "Behavioral influences on weight judgments in multiattribute decision making", *Eur. J. Oper. Res.*, 67: 1–12, (1993).
- [5] Zhu, G.N., Hu, J., Qi, J., Gu, C.C., Peng, J.H., "An integrated AHP and VIKOR for design concept evaluation based on rough number", *Adv. Eng. Inform.*, 29: 408–418, (2015).
- [6] Zavadskas, E.K., Govindan, K., Antucheviciene, J., Turskis, Z. "Hybrid multiple criteria decision-making methods: A review of applications for sustainability issues". *Econ. Res.-Ekonomika Istraživanja*, 29: 857–887, (2016).
- [7] Madić, M., Radovanović, M., Petković, D., "Non-conventional machining processes selection using multi-objective optimization on the basis of ratio analysis method". *Journal of Engineering Science and Technology*, (10)11: 1441-1452, (2015).
- [8] Khandekar, A. V., Chakraborty, S., "Application of fuzzy axiomatic design principles for selection of non-traditional machining processes", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1-4): 529-543, (2016).
- [9] Roy, M. K., Ray, A., Pradhan, B. B., "Non-traditional machining process selection-an integrated approach",

- International Journal for Quality Research*, 11(1): 71-94, (2017).
- [10] Boral, S., Chakraborty, S., “A case-based reasoning approach for non-traditional machining processes selection”, *Advances in Production Engineering & Management*, 11(4): 311-323, (2016).
- [11] Chen, S.J., and Hwang, C.L., *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making*, Springer-Verlag, (1992).
- [12] Zadeh, L., “The concept of a linguistic variable and its applications to approximate reasoning”, *Inform Sciences*, Part I (No. 8), 199–249, (1975).
- [13] Carlsson, C., and Fullér, R., “Fuzzy multiple criteria decision making: Recent developments”, *Fuzzy Set Syst*, 78(2): 139-153, (1996).
- [14] Ribeiro, R.A., “Fuzzy multiple attribute decision making: A review and new preference elicitation techniques”, *Fuzzy Set Syst*, 78(2): 155-181, (1996).
- [15] Triantaphyllou, E., and Lin, C.T., “Development and evaluation of five fuzzy multiattribute decision-making methods”, *Int J Approx Reason*, 14(4): 281-310, (1996).
- [16] Abdullah, L., “Fuzzy Multi Criteria Decision Making and its Applications: A Brief Review of Category”, *Procedia -Social and Behavioral Sciences*, 97: 131-136, (1996).
- [17] Atanassov, K.T., “Intuitionistic Fuzzy Sets”, *Fuzzy Set Syst*, 20: 87-96, (1986).
- [18] Yager, R.R., On The Theory of Bags, *Int J Gen Syst*, 13(1): 23-37, (1986).
- [19] Torra, V., Hesitant fuzzy sets, *Int J Intell Syst*, 25(6): 529-539, (2010).
- [20] Xu, Z., *Hesitant Fuzzy Sets Theory*, Springer, (2014).
- [21] Rodriguez, R.M., Martinez, L., and Herrera, F., “Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets for Decision Making”, *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, 20(1): 109- 119, (2012).
- [22] Chen, S., and Hwang, C.L., *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications*, Springer-Verlag, (1992).
- [23] Ye, F., and Li, Y.N., “An extended TOPSIS model based on the Possibility theory under fuzzy environment”, *Knowl-Based Syst*, 67:263-269, (2014).
- [24] Kahraman, C., Çevik, S., Ates, N.Y., and Gülbay, M., “Fuzzy multi-criteria evaluation of industrial roboticsystems”, *Computers and Industrial Engineering*, 52(4): 414-433, (2007).
- [25] Chen, C.B., and Wei, C.C., “An approach for solving fuzzy MADM problems”, *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 5(4): 459-480, (1997).
- [26] Kannan, D., De Sousa Jabbour, A.B.L., and Jabbour, C.J.C., “Selecting green suppliers based on GSCM practices: Using Fuzzy TOPSIS applied to a Brazilian electronics company”, *Eur J Oper Res*, 233(2): 432-447, (2014).
- [27] Wang, Y.J., “The evaluation of financial performance for Taiwan container shipping companies by fuzzy TOPSIS”, *Applied Soft Computing Journal*, 22: 28-35, (2014).
- [28] Chu, T.C., “Facility location selection using fuzzy topsis under group decisions”, *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 10(6): 687-701, (2002).
- [29] Mandic, K., Delibasic, B., Knezevic, S., and Benkovic, S., “Analysis of the financial parameters of Serbian banks through the application of the fuzzy AHP and TOPSIS methods”, *Economic Modelling*, 43: 30-37, (2014).
- [30] Zhang, G., and Lu, J., “An Integrated Group Decision-Making Method Dealing with Fuzzy Preferences for Alternatives and Individual Judgments for Selection Criteria”, *Group Decision and Negotiation*, 12: 501-515, (2003).
- [31] Tsaura, S.H., Chang, T.Y., and Yen, C.H., “The evaluation of airline service quality by fuzzy MCDM”, *Tourism Management*, 23(2): 107-115, (2002).
- [32] Harding JA, Shahbaz M, Srinivas, Kusiak A., “Data mining in manufacturing: a review”. *J Manuf Sci Eng.*, 128(4): 969-976, (2016).
- [33] Köksal G, Batmaz I, Testik MC., “A review of data mining applications for quality improvement in manufacturing industry”. *Expert Syst Appl.*, 38(10): 13448-1346, (2011).
- [34] Piatetsky G., “Where Analytics, Data Science, Machine Learning were Applied: Trends and Analysis”. *KNuggets*, (2018).
- [35] Chen C.T., “Extensions of the TOPSIS for Group Decision Making under Fuzzy Environment”, *Fuzzy Sets and Systems*, 114: 1-9, (2000).
- [36] Turskis, Z. and Zavadskas, E. K. and Antucheviciene, J. and Kosareva, N., “A Hybrid Model Based on Fuzzy AHP and Fuzzy WASPAS for Construction Site Selection”, *International Journal of Computers Communications & Control*, 10(6): 873-888, (2015).
- [37] Pamucar, D., Stevic, Z., Sremac, S., “A New Model for Determining Weight Coefficients of Criteria in MCDM Models: Full Consistency Method (FUCOM)”, *Symmetry*, 10(9): 393, (2018).
- [38] Kul Y. Şeker A., and Yurdakul M., “Usage of fuzzy multi criteria decision making methods in selection of nontraditional manufacturing methods”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(3): 589-603, (2014).

**APPENDIX****Table A.1.** Criteria-alternative matrix for case study [38]

	Surface finish			Surface damage			Taper			MRR			WM			Cost		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
1.AJM	1.25	0.6	0.25	0.03	0.025	0.02	0.006	0.005	0.004	20	50	200	8	9	10	12	17	22
2.USM	0.75	0.5	0.25	0.03	0.025	0.02	0.005	0.004	0.003	300	600	2100	2	3	4	20	25	30
3.ECM	1.5	1	0.2	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001	500	2000	14000	8	9	10	31	36	41
4.CHM	2.5	2	0.5	0.006	0.005	0.004	0.4	0.3	0.2	15	40	140	5	6	7	16	21	26
5.EDM	3	2	0.3	0.03	0.02	0.01	0.003	0.002	0.001	100	800	1300	8	9	10	27	32	37
6.EBM	4	3	1	0.03	0.025	0.025	0.25	0.2	0.15	0.3	2	6	5	6	7	19	24	29
7.LBM	1.5	1	0.4	0.15	0.1	0.05	0.06	0.05	0.04	0.1	2	5	5	6	7	17	22	27
8.AWJM	0.4	0.3	0.2	0.03	0.025	0.02	0.004	0.003	0.003	300	600	2000	8	9	10	13	19	24
9.RUSM	0.75	0.5	0.25	0.03	0.025	0.025	0.005	0.004	0.003	400	800	2400	2	3	4	22	27	32



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# A finite element procedure for sliding contact problems involving heterogeneous coefficient of friction

*Heterojen sürtünme katsayılı kayma temas problemleri için bir sonlu elemanlar çözümü*

*Author(s) (Yazar(lar)):* Onur ARSLAN

*ORCID:* 0000-0002-5668-1306

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Arslan O., “A finite element procedure for sliding contact problems involving heterogeneous coefficient of friction”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 197-205, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.469932

# A Finite Element Procedure for Sliding Contact Problems Involving Heterogeneous Coefficient of Friction

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Onur ARSLAN\*

Department of Mechanical Engineering, Eskisehir Osmangazi University, Turkey

(Received/ Geliş : 12.10.2018 ; Accepted/Kabul : 27.10.2019)

## ABSTRACT

A new finite element procedure is developed for the analysis of sliding contact problems involving spatially varying coefficient of friction. The problem is implemented using APDL (ANSYS Parametric Design Language) considering the Augmented Lagrange method as the contact solver. Upon discretization of the contact interface into multiple contact pairs, a sequence of steps is followed to evaluate the resultant friction force required for the sliding contact. As a case study, heterogeneous-friction contact problem between an orthotropic laterally graded half-plane and a rigid flat stamp is investigated under plane strain assumption. The proposed iterative procedure is proved reliable by comparing the results to those generated by a SIE (Singular Integral Equation) approach for isotropic laterally graded half-planes. Extra results are presented to reveal the effects of problem parameters on the contact stresses and the friction force. The paper outlines a convenient numerical solution for an advance sliding contact problem, and the results can be used in validation purposes of experimental and analytical studies.

**Keywords:** Heterogeneous friction coefficient, sliding frictional contact, laterally graded materials, finite element method.

# Heterojen Sürtünme Katsayılı Kayma Temas Problemleri için bir Sonlu Elemanlar Çözümü

## ÖZ

Yatay ekseninde değişkenlik gösteren sürtünme katsayısının var olduğu kayma temas problemleri için yeni bir sonlu elemanlar yöntemi geliştirilmiştir. Problem için "Augmented Lagrange" yöntemi temel temas problemi çözücüsü olarak seçilmiş ve modellemeler APDL (ANSYS Parametrik Tasarım Dili) ortamında yapılmıştır. Temas ara-yüzeyinin birçok temas çiftine bölünmesiyle kaymalı temas için gerekli olan sürtünme kuvveti, geliştirilen yinelemeli bir algoritma ile hesaplanmıştır. Durum incelemesi olarak bir rijit düz zımba ile enine derecelendirilmiş ortotropik yarı-düzlem arasındaki heterojen-sürtünmeli kayma temas problemi düzlem gerinimi varsayımı ile ele alınmıştır. Bu çalışmada ortaya konulan prosedürün güvenilirliği ve geçerliliği, sonuçlarının literatürde var olan (Tekil integral denklemleri kullanılarak izotropik malzemeler için elde edilmiş) sonuçlarla karşılaştırılarak ispatlanmıştır. Yanı sıra bu çalışmada çeşitli problem parametrelerinin temas gerilmeleri ve sürtünme kuvveti üzerine olan etkileri gösterilmiştir. Bu çalışma ileri seviye bir temas probleminin çözümü için kolay uygulanabilir yeni bir sayısal yöntem ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar analitik ve deneysel çalışmaların yorumlanması ve doğrulanmasında kullanılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Heterojen sürtünme katsayısı, sürtünmeli temas, enine derecelendirilmiş malzemeler, sonlu elemanlar yöntemi.

## 1. INTRODUCTION

In literature, contact mechanics analyses between mating components have been performed to be able to predict and restrain damages triggered by contact stresses. From this aspect, optimization of problem parameters that provide mitigation of contact stresses becomes essential for the purpose of service life extension. The prominent failure type induced by the frictional contact loadings is the formation of surface crackings, the risks of which can be alleviated by introducing spatial material gradations through the elastic medium [1-2]. The graded structures

employed in contacting bodies macroscopically acquire smooth spatial transitions from brittle to ductile materials via special production techniques, such as electron beam physical vapor deposition (EBPVD) and thermal spraying [3-4]. Investigations on the microstructure of the deposited structures reveal that they have anisotropic material characteristics. For instance, the coatings manufactured through the plasma spray technique are observed to be disposed in thin plates possessing direction-dependent material properties [5]. Column-like forms are shown in the microstructure of EBPVD coatings [6]. Therefore, it becomes physically rational to consider a deposited graded structure as an orthotropic graded elastic material. There are a vast amount of

\* Corresponding Author (Sorumlu Yazar)  
e-mail : oarslan@ogu.edu.tr

studies regarding frictional/frictionless contact mechanics problems of orthotropic homogeneous/graded structures. Shi et al. [7] have solved the contact problem between an orthotropic half-plane and a punch of an ellipsoidal profile. A similar problem has been investigated by Swanson [8] employing a point load solution. A contact mechanics model for an orthotropic viscoelastic-half plane has been proposed by Rodriguez et al. [9]. Dong et al. [10] have performed a solution for the frictionless contact problem of an orthotropic homogeneous half-plane loaded by collinear stamps. A study examining the dynamic effects of the frictional sliding contact on an orthotropic homogeneous half-space has been put forward by Zhou et al. [11]. Zhou and Lee [12] have developed closed-form solutions for the contact problems of piezoelectric orthotropic homogeneous half-planes. A SIE (singular integral equation) based analytical solution for the frictional contact problem between an orthotropic homogeneous half-plane and a flat punch has been carried out by Guler [13]. Kucuksucu et al. [14] have outlined a semi-analytical SIE solution on the frictional sliding contact mechanics problem of an orthotropic graded half-plane. Guler et al. [15] have examined the circular punch contact on an orthotropic graded half-plane employing both semi-analytical SIE approach and finite element method. Arslan and Dag [16] have put forward a dual solution for the frictional contact mechanics problem of an orthotropic graded coating loaded through flat and triangular rigid punches. Both finite element method and SIE approach have been employed in that study.

In the aforementioned articles material gradations are introduced through thickness direction. Gradation of material properties in lateral direction are also considered in many studies. Dynamics of laterally graded beams [17], elastic wave propagation in laterally graded waveguides [18], decay of Saint-Venant end effect in laterally graded inhomogeneous solids [19] and frictional sliding contact analysis of laterally graded half-planes [20-23] has been investigated in literature.

Studies related to sliding contact mechanics analyses usually consider constant friction coefficient through contact interfaces. However, the formation of surface crackings due to frictional contact forces inevitably leads to fretting fatigue [24] and; in fretted contact interfaces spatial variation of the friction coefficient has been revealed experimentally [25-26]. Moreover, it has been claimed that change in material constituents through the lateral direction inherently causes spatial variation of the friction coefficient [22]. Hence, interpretations on the influences of friction variation upon contact stresses can be useful before conducting experiments such as fretting fatigue [25] and sliding contact tests [27]. In literature only a few studies consider heterogeneous friction coefficient in contact problems utilizing analytical techniques. Dag [22] has outlined a SIE based study on the contact problem of an isotropic laterally graded material pressed against a rigid flat stamp under plane strain assumption. Exponential spatial variation of the

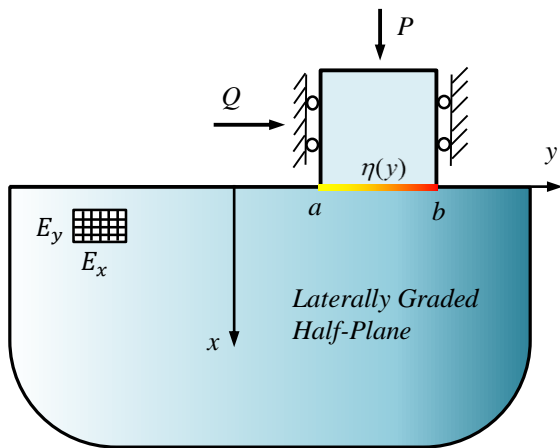
friction coefficient at the contact interface is assumed to prevail in the mentioned study. Ballard [28] has studied a plane contact problem between an isotropic homogeneous elastic half-space and a rigid punch of an arbitrary profile, where the friction coefficient is a step function through a spatial coordinate axis.

Although analytical studies have many potential merits, they are generally toilsome to handle. Hence computational procedures focusing on different contact problems should be developed for the purpose of validation of analytical studies and, to conveniently figure out contact behavior of materials under various contact conditions. In this paper, a new finite element procedure is proposed for the solution of heterogeneous-friction contact problems. The study is conducted utilizing ANSYS Parametric Design Language (APDL) regarding plane strain assumption. The augmented Lagrange algorithm is selected as a contact solver. Upon discretization of the contact interface into multiple contact pairs, friction coefficient of each contact pair is computed using the position of its centroid. The resultant friction force which is required for the sliding contact analysis is evaluated through a successfully converging iterative set of steps. The heterogeneous-friction contact problem of an orthotropic laterally graded half-plane loaded through a rigid flat stamp is selected as the case study, which has not been investigated in any work published so far. Exponential spatial variations for the orthotropic stiffness coefficients and the friction coefficient are introduced through the lateral direction. The procedure is validated referring the comparisons of the results to those computed by a SIE approach for isotropic laterally graded materials [22]. Extra results are provided to reveal the effects of the friction variation, degree of orthotropy and non-homogeneity parameter upon the contact stress curves and the friction force. The procedure presented in this study is shown to be effective in solution of advance contact problems with spatially varying physical properties at contact interface. As a prominent conclusion of the case study, one can infer that the contact stresses can be mitigated remarkably upon increasing the degree of orthotropy.

**2. SOLUTION PROCEDURE**

The problem geometry is depicted in Fig. 1. A heterogeneous-friction contact problem between an orthotropic laterally graded half-plane and a flat rigid punch is investigated. The friction force  $Q$  and the contact force  $P$  are transferred through a rigid flat punch. Orthotropic stiffness coefficients of the elastic medium are stated in the reduced constitutive relations for plane strain assumption:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx}(x, y) \\ \sigma_{yy}(x, y) \\ \sigma_{xy}(x, y) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}(y) & c_{12}(y) & 0 \\ c_{12}(y) & c_{22}(y) & 0 \\ 0 & 0 & c_{66}(y) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}(x, y) \\ \varepsilon_{yy}(x, y) \\ 2\varepsilon_{xy}(x, y) \end{Bmatrix} \quad (1)$$



**Figure 1.** Problem Configuration

where  $\varepsilon_{ij}(x, y)$  ( $i, j = x, y$ ) and  $\sigma_{ij}(x, y)$  ( $i, j = x, y$ ) are the strain and stress components, respectively.  $c_{11}(y)$ ,  $c_{22}(y)$ ,  $c_{12}(y)$  and  $c_{66}(y)$  are the orthotropic stiffness coefficients, each of which exponentially varies through the lateral  $y$ -direction [16]:

$$c_{11}(y) = c_{110}e^{\alpha y}, \quad c_{22}(y) = c_{220}e^{\alpha y}. \quad (2a-b)$$

$$c_{12}(y) = c_{120}e^{\alpha y}, \quad c_{66}(y) = c_{660}e^{\alpha y}. \quad (2c-d)$$

here  $\alpha$  represents the non-homogeneity parameter.  $c_{110}$ ,  $c_{220}$ ,  $c_{120}$  and  $c_{660}$  are the orthotropic stiffness constants defined in terms of the engineering parameters at  $y=0$ :

$$c_{110} = \frac{E_x^2 (v_{yz}^2 v_{zx} E_x - v_{xz} E_y)}{\Delta} \quad (3a)$$

$$c_{220} = \frac{v_{xz} E_x E_y^2 (v_{xz} v_{zx} - 1)}{\Delta} \quad (3b)$$

$$c_{120} = - \frac{v_{xz} E_x E_y (v_{yz} v_{zx} E_x + v_{xy} E_y)}{\Delta} \quad (3c)$$

$$c_{660} = \mu_{xy} \quad (3d)$$

$$\Delta = v_{yz}^2 v_{zx} E_x^2 + v_{xy}^2 v_{xz} E_y^2 + v_{xz} E_x E_y (v_{xz} v_{zx} + 2v_{xy} v_{yz} v_{zx} - 1) \quad (3e)$$

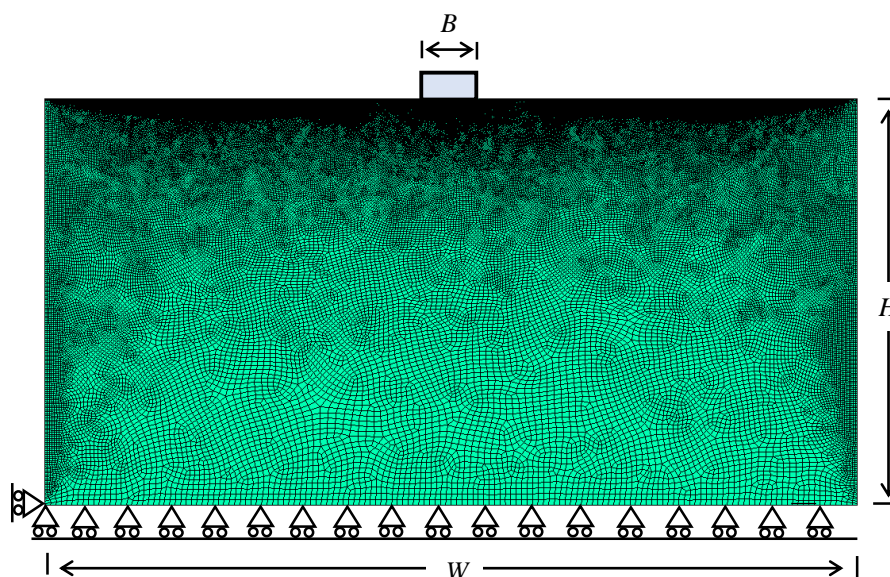
A spatially varying friction coefficient prevails at the contact interface, which is expressed as follows [22]:

$$\eta(y) = \eta_a \exp \left\{ \ln \left( \frac{\eta_b}{\eta_a} \right) \frac{y-a}{b-a} \right\} \quad a < y < b \quad (4)$$

where  $a$  and  $b$  stand for the locations of the punch edges as seen in Fig. 1 and,  $\eta_a = \eta(a)$  and  $\eta_b = \eta(b)$ .

Solution of the problem is carried out utilizing APDL. The finite element model used can be seen in Fig. 2. Dimensions of the rectangular finite element model are selected in such a way that they have no effect on the stresses in the vicinity of the contact region. A total of 94883 quadrilateral and triangular finite elements are employed in the discretization. Note that a high degree of mesh refinement is arranged in the model in order to capture the elastic gradation better. The variations of the orthotropic stiffness coefficients through the half-plane are imposed by using the homogeneous finite element approach which is integrated into APDL code. In the homogeneous finite element method, the material properties of finite elements are defined at their centroids.

Since heterogeneous friction coefficient prevails between the medium surface and the flat punch surface, the contact region is needed to be discretized into multiple contact pairs for each of which different friction coefficient can be assigned. Illustration of the contact pairs used can be seen in Fig. 3. Equally sized 300 contact



**Figure 2.** Finite element model;  $B/H = 2/15$  ;  $B/W = 1/15$ .



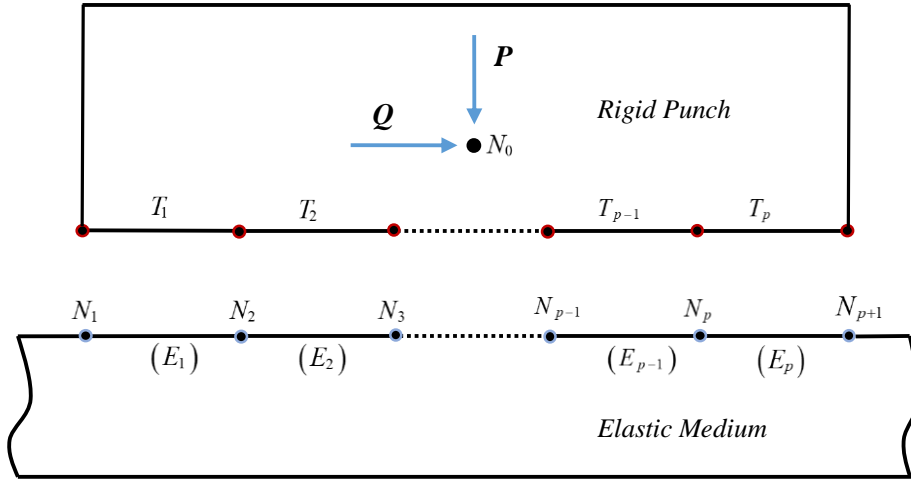


Figure 3. Demonstration of contact pairs

pairs are defined in order to impose a smooth spatial variation of the friction coefficient through the contact region. Hence 300 target surfaces ( $T_i$ ) and 300 corresponding contact surfaces ( $E_i$ ) are employed in the model. Note that each of the contact surfaces ( $E_i$ ) is represented by a single contact element CONTA172.

contact pairs, at which the contact forces  $Q$  and  $P$  are exerted (see Fig. 3). Note that rotation of the pivot node  $N_0$  is fixed to zero.

The friction force  $Q$  required for the frictional sliding contact is dependent on the distribution of normal traction  $\sigma_{xx}(0, y)$  through the contact interface, hence cannot be determined directly. In conjunction with a successfully converging iterative set of steps (see Fig. 4), the friction force  $Q$  is computed as the summation of friction forces generating at the contact pairs:

$$Q = \sum_{i=1}^p \frac{b-a}{p} \eta(r_i) \sigma^{E_i} \quad (5)$$

where  $\sigma^{E_i}$ ,  $p$ ,  $r_i$ ,  $\eta(r_i)$  represent the elementary normal tractions, total number of contact pairs, centroidal positions of the contact surfaces  $E_i$ , respectively.  $\sigma^{E_i}$  and  $r_i$  are computed as follows:

$$\sigma^{E_i} = \frac{(\sigma_{xx}^{N_i} + \sigma_{xx}^{N_{i+1}})}{2} \quad (i = 1, \dots, p) \quad (6)$$

$$r_i = \frac{(2i-1)(b-a)}{2p} + a \quad (i = 1, \dots, p) \quad (7)$$

$\sigma_{xx}^{N_i}$  ( $i = 1, \dots, p+1$ ) here stands for the normal tractions on the nodes  $N_i$  that are illustrated in Fig. 3. Note that extrapolation of the traction values found at gauss integration points to nodes yields very accurate results and, does not create any convergence difficulties as can be observed in the following section.

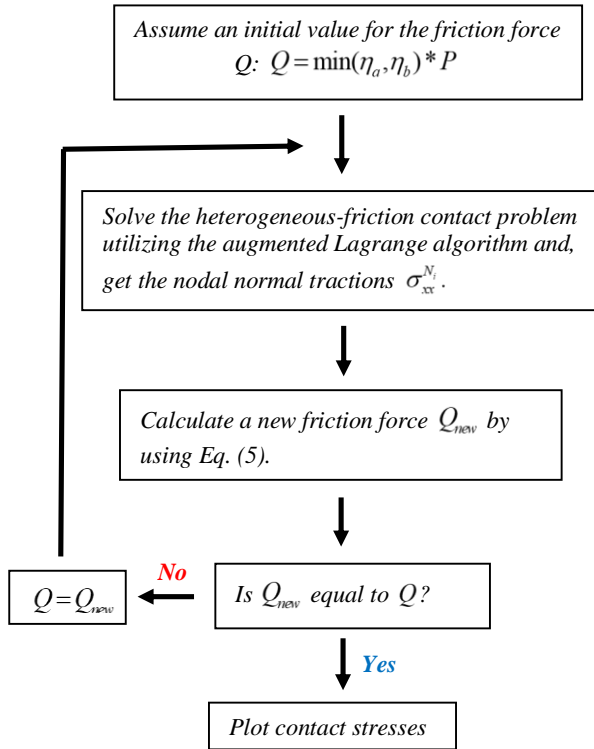
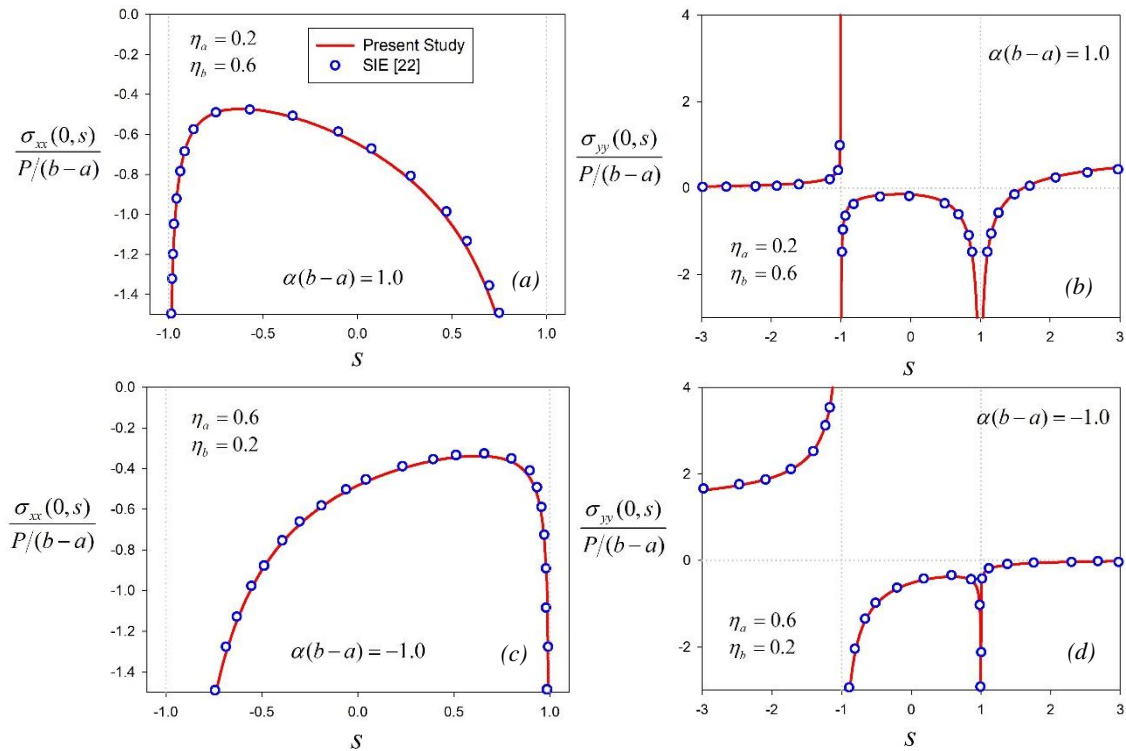


Figure 4. Computation of the friction force  $Q$ .

Similarly, each of the target surfaces ( $T_i$ ) is represented by a single rigid target element TARGE169. The values of the friction coefficient to be assigned for the contact pairs are computed using their centroidal locations and Eq. (4). A mutual pivot node  $N_0$  is identified for all the

### 3. CASE STUDY

As seen in Fig. 1, a complete heterogeneous-friction contact prevails between the elastic surface and the flat rigid stamp, whose trailing and leading ends are located at  $y=a$  and  $y=b$ , respectively.  $P$  and  $Q$  represents the normal and frictional contact forces acting on the stamp.



**Figure 5.** Comparisons of the normalized contact stresses to those generated by a SIE [22] approach for isotropic laterally graded half-planes: (a-b) Normal and lateral stresses for  $\alpha(b-a) = 1.0$ ,  $\eta_a = 0.2$ ,  $\eta_b = 0.6$ ; (c-d) Normal and lateral stresses for  $\alpha(b-a) = -1.0$ ,  $\eta_a = 0.6$ ,  $\eta_b = 0.2$ ;  $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = \nu = 0.25$ ;  $E_x = E_y = E_z = 2(1 + \nu)\mu_{xy}$ .

$\eta(y)$  stands for the friction coefficient which is an exponential function of y-coordinate. In the first section of the parametric analyses, comparison results are presented to reveal the validity of the computational procedure. After all, effects of problem parameters on the

indicates that x-axis passes through the centerline of the stamp. It is worthy of notice that the elastic medium stiffens in positive y-direction when  $\alpha(b-a) > 0$  and softens when  $\alpha(b-a) < 0$ .

**Table 1.** Comparisons of Q/P results to those generated by a SIE [22] approach for isotropic laterally graded half-planes subjected to heterogeneous-friction contact;  $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = \nu = 0.25$ ;  $\mu_{xy} = \mu$ ;  $E_x = E_y = E_z = 2(1 + \nu)\mu$ .

	Q/P							
	$\alpha(b-a) = 1.0, \eta_a = 0.2.$				$\alpha(b-a) = -1.0, \eta_b = 0.2.$			
	$\eta_b = 0.2$	$\eta_b = 0.4$	$\eta_b = 0.6$	$\eta_b = 0.8$	$\eta_a = 0.2$	$\eta_a = 0.4$	$\eta_a = 0.6$	$\eta_a = 0.8$
SIE [22]	0.200	0.324	0.434	0.532	0.200	0.339	0.473	0.606
Present	0.199	0.322	0.431	0.529	0.199	0.336	0.467	0.599
Diff. %	0.50	0.62	0.69	0.56	0.50	0.88	1.20	1.16

results are demonstrated. To be able to evaluate results independent of scaling, the problem parameters must be represented in their normalized forms. Hence, the stiffness gradation and stresses are normalized with respect to the normal contact force  $P$  and the punch size  $(b-a)$ .

All the normalizations considered in the present work are taken consistent with the SIE based study performed by Dag [22]. The non-homogeneity parameter  $\alpha$  is normalized with respect to the contact length as  $\alpha(b-a)$ . Moreover,  $\alpha(b+a) = 0$  in all the computations, which

The contact stress curves are presented in normalized forms with respect to the nominal contact force  $P/(b-a)$ . The plots for the normalized normal stress  $\sigma_{xx}(x, y)/(P/(b-a))$  and lateral stress  $\sigma_{yy}(x, y)/(P/(b-a))$  are generated versus the non-dimensional y-coordinate:

$$s = \frac{2y - (b+a)}{b-a} \tag{8}$$

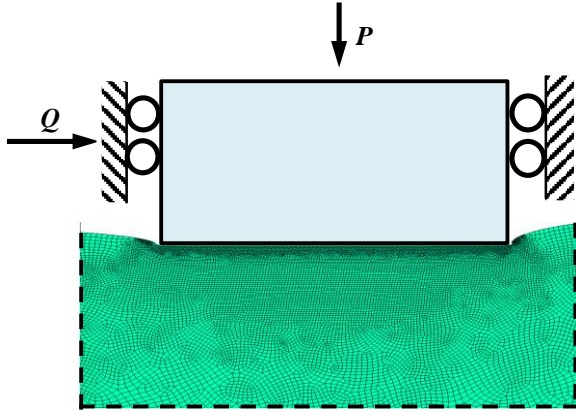
Note that  $s = +1$  at the leading end and,  $s = -1$  at the trailing end of the flat punch. Plasma-sprayed Alumina is

utilized as the reference orthotropic material at  $s=0$ , for which the mechanical properties read [16]:

$$E_x = 116.36 \text{ GPa}, \quad E_y = 90.43 \text{ GPa}. \quad (9a-b)$$

$$\mu_{xy} = 38.21 \text{ GPa} \quad (9c)$$

$$\nu_{xy} = 0.28, \quad \nu_{xz} = 0.27, \quad \nu_{zx} = 0.21, \quad \nu_{zy} = 0.14. \quad (9d-g)$$



**Figure 6.** Deformed contact zone of an orthotropic laterally graded half-plane;  $\alpha(b-a) = 1.0$ ;  $\eta_a = 0.2$ ;  $\eta_b = 0.6$ .

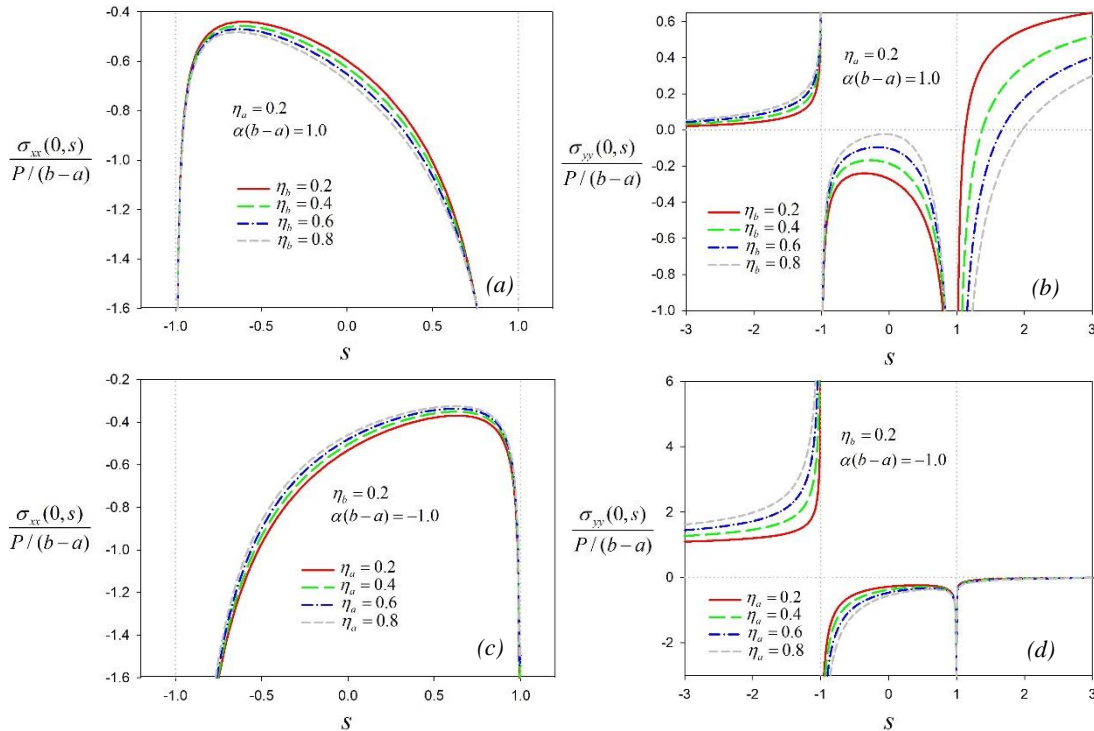
The other mechanical properties are computed through:

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y}, \quad \frac{\nu_{xz}}{E_x} = \frac{\nu_{zx}}{E_z}, \quad \frac{\nu_{yz}}{E_y} = \frac{\nu_{zy}}{E_z}. \quad (10a-c)$$

Additionally, an orthotropic material must obey the following restrictions [16]:

$$1 - \nu_{xy}\nu_{yx} > 0, \quad 1 - \nu_{xz}\nu_{zx} > 0, \quad 1 - \nu_{yz}\nu_{zy} > 0. \quad (11a-c)$$

$$1 - \nu_{xy}\nu_{yx} - \nu_{xz}\nu_{zx} - \nu_{yz}\nu_{zy} - 2\nu_{xy}\nu_{yz}\nu_{zx} > 0 \quad (11d)$$

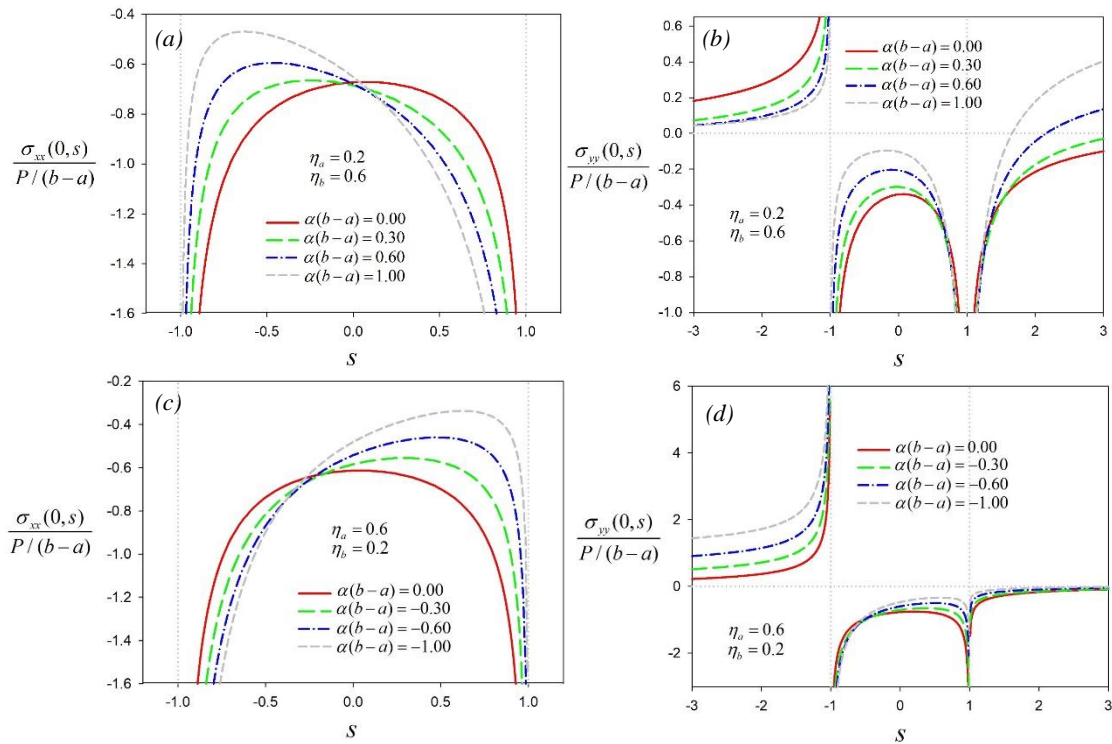


**Figure 7.** Effect of the friction coefficient variation on the normalized contact stress distributions for orthotropic laterally graded half-planes: (a, c) Normal stresses; (b, d) Lateral stresses.

The proposed finite element procedure is developed considering an orthotropic laterally graded material model. By using the same procedure, one can also get results for isotropic laterally graded materials in which only the shear modulus is graded. Hence, parametric analysis for isotropic laterally graded materials can be performed employing the reductions:

$$E_x = E_y = E_z = 2(1 + \nu)\mu \quad (12)$$

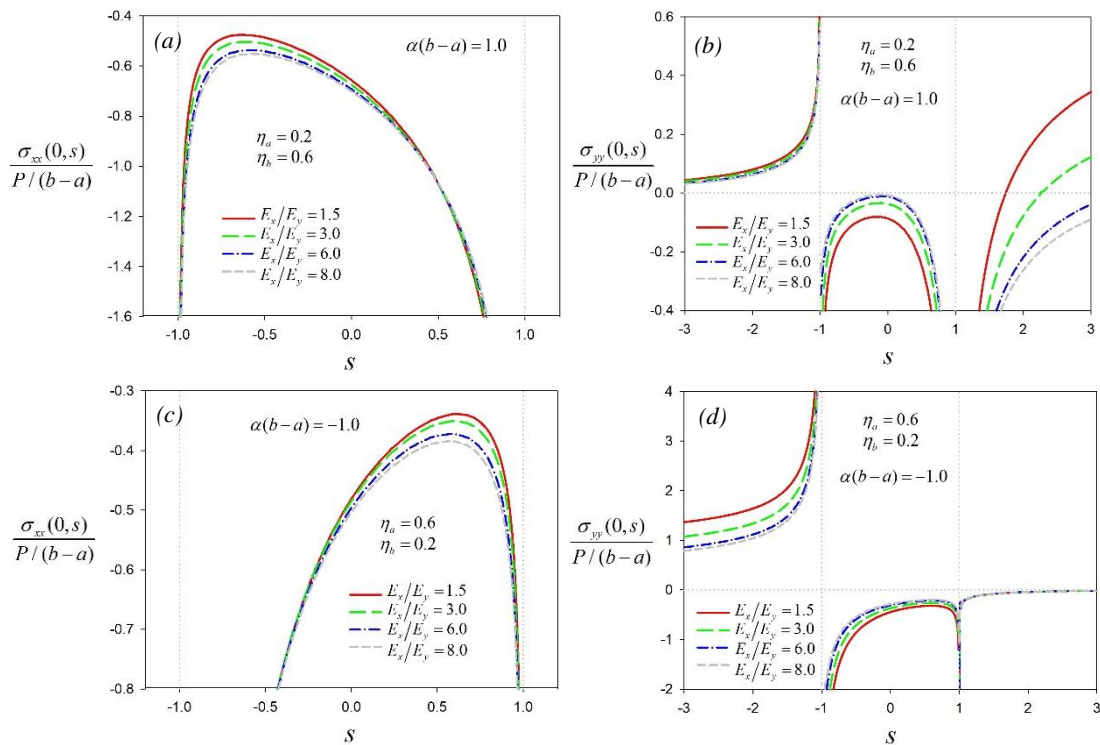
where  $\nu$  and  $\mu$  represent the Poisson's ratio and shear modulus for isotropic materials, respectively. Fig. 5 illustrates some comparisons of the normalized stress results to those evaluated in a study based on the SIE approach [22] for isotropic laterally graded half-planes. Table. 1 tabulates the contact force ratio  $Q/P$  evaluated by the present procedure and a SIE approach for isotropic laterally graded materials. These results are computed for 2 different non-homogeneity parameters and 4 different friction coefficients. Note that the friction coefficient is assumed to increase in positive y-direction when  $\alpha(b-a) > 0$  and decrease when  $\alpha(b-a) < 0$  in all the computations. Also note that when the difference between  $\eta_a$  and  $\eta_b$  is increased, the degree of variation in the friction coefficient increases through the contact interface. As can be observed in Fig. 5 and Table.1, excellent agreement of the results with those generated by a SIE approach is attained for various combinations of the problem parameters. Hence, the proposed procedure seems highly feasible in the examination of heterogeneous-friction sliding contact problems.



**Figure 8.** Effect of the lateral gradation on the normalized contact stress distributions for orthotropic laterally graded half-planes: (a, c) Normal stresses; (b, d) Lateral stresses.

Fig. 6 depicts the deformed contact zone of an orthotropic laterally graded half-plane for  $\alpha(b-a) = 1.0$ ,  $\eta_a = 0.2$ ,  $\eta_b = 0.6$ . Fig. 7 plots the effects of the friction coefficient variation on the normalized normal stress

$\sigma_{xx}(x, y)/(P/(b-a))$  and lateral stress  $\sigma_{yy}(x, y)/(P/(b-a))$  for orthotropic laterally graded half-planes. When the friction coefficient at the leading end  $\eta_b$  is increased from 0.2 to 0.8 for  $\alpha(b-a) = 1.0$



**Figure 9.** Effect of the elastic modulus ratio on the normalized contact stress distributions for orthotropic laterally graded half-planes: (a, c) Normal stresses; (b, d) Lateral stresses.

and  $\eta_a = 0.2$ , magnitude of the normalized normal stress  $\sigma_{xx}(x, y)/(P/(b-a))$  elevates. Experimental studies reveal that the lateral tensile stresses occurring due to the sliding frictional contact loadings play a prominent role in the surface crack initiation near trailing ends [1-2].

$\alpha(b-a) = -1.0$ , magnitude of the normalized normal stress increases and, the normalized lateral tensile stress decreases remarkably as seen in Fig. (9d). Table. 2 tabulates the force ratio  $Q/P$  evaluated by considering orthotropic laterally graded materials for various

**Table 2.**  $Q/P$  results for orthotropic laterally graded materials subjected to heterogeneous friction contact.

$E_x/E_y$	$Q/P$							
	$\alpha(b-a) = 1.0, \eta_a = 0.2.$				$\alpha(b-a) = -1.0, \eta_b = 0.2.$			
	$\eta_b = 0.2$	$\eta_b = 0.4$	$\eta_b = 0.6$	$\eta_b = 0.8$	$\eta_a = 0.2$	$\eta_a = 0.4$	$\eta_a = 0.6$	$\eta_a = 0.8$
1.5	0.199	0.322	0.430	0.528	0.199	0.336	0.468	0.600
3.0	0.199	0.320	0.425	0.520	0.199	0.335	0.467	0.598
6.0	0.200	0.317	0.419	0.510	0.200	0.333	0.463	0.592

When  $\eta_b$  is raised from 0.2 to 0.8 for  $\alpha(b-a) = 1.0$  and  $\eta_a = 0.2$ , the normalized lateral tensile stress also increases. When the friction coefficient at the trailing end  $\eta_a$  is increased from 0.2 to 0.8 for  $\alpha(b-a) = -1.0$  and  $\eta_b = 0.2$ , magnitude of the normalized normal stress decreases, whereas the normalized lateral tensile stress increases significantly. In Fig. 8, influences of the lateral gradation on the normalized normal stress  $\sigma_{xx}(x, y)/(P/(b-a))$  and lateral stress  $\sigma_{yy}(x, y)/(P/(b-a))$  are demonstrated for orthotropic laterally graded half-planes. As the normalized non-homogeneity parameter  $\alpha(b-a)$  is increased from 0.00 to 1.00 for  $\eta_a = 0.2$  and  $\eta_b = 0.6$ , the normalized normal stress curve slants to the left decreasing in magnitude near the trailing end. Considering the same alteration on  $\alpha(b-a)$ , the normalized lateral stress decreases remarkably as seen in Fig. 8(b). When the normalized non-homogeneity parameter  $\alpha(b-a)$  is decreased from 0.00 to -1.00 for  $\eta_a = 0.6$  and  $\eta_b = 0.2$ , the normalized normal stress curve slants to the right decreasing in magnitude near the leading end. The normalized lateral stress increases significantly when the same alteration is employed in  $\alpha(b-a)$ .

Fig. 9 depicts effects of degree of orthotropy on the normalized normal stress  $\sigma_{xx}(x, y)/(P/(b-a))$  and lateral stress  $\sigma_{yy}(x, y)/(P/(b-a))$  for orthotropic laterally graded half-planes. To be able obtain orthotropic materials possessing different  $E_x/E_y$  ratios,  $E_x$  of the Plasma-sprayed Alumina is altered taking the restrictions in Eqs. (10) and (11) into account. As the ratio  $E_x/E_y$  is increased from 1.5 to 8.0 for  $\eta_a = 0.2$ ,  $\eta_b = 0.6$  and  $\alpha(b-a) = 1.0$ , magnitude of the normalized normal stress increases and, the normalized lateral tensile stress is almost not effected. When the ratio  $E_x/E_y$  is increased from 1.5 to 8.0 for  $\eta_a = 0.6$ ,  $\eta_b = 0.2$  and

combinations of the problem parameters. When  $\alpha(b-a) < 0$ , the force ratio  $Q/P$  becomes larger relative to the case  $\alpha(b-a) > 0$ . When  $E_x/E_y$  is increased from 1.5 to 6.0, a slight drop is observed in the force ratio  $Q/P$  for all the cases.

#### 4. CONCLUSIONS

In this paper an iterative computational procedure is developed to investigate heterogeneous-friction sliding contact problems. As the case study, the contact mechanics problem between a flat rigid punch and a laterally graded orthotropic medium is examined considering exponentially varying friction coefficient at the interface. The problem is handled under plane strain assumption via APDL. In the first stage of the parametric analyses, comparisons of the numerical results to those evaluated by a SIE approach is given for isotropic laterally graded materials. Excellent agreement between two methods reveals the reliability of the proposed finite element procedure. Effects of the problem parameters are also illustrated. When positive lateral gradation ( $\alpha > 0$ ) is introduced through the medium, the risks of failure due to surface crack initiations can be alleviated. However, negative gradation ( $\alpha < 0$ ) through the orthotropic medium increases the surface cracking risks. As the degree of orthotropy is increased, failure risks due to lateral tensile stress can be mitigated remarkably regardless of the sign of gradation. Also note that the surface cracking risks may increase dramatically with the change of the friction coefficient at the trailing end. As well as presenting an effective computational approach for heterogeneous-friction contact mechanics problems, this study provides results that can be useful in the validation of analytical studies and, in the prediction of contact behaviors of advanced materials before performing experiments.

## REFERENCES

- [1] Suresh S., "Graded materials for resistance to contact deformation and damage", *Science*, 292: 2447–2451, (2001)
- [2] Zhang Y., "Overview: Damage resistance of graded ceramic restorative materials", *Journal of the European Ceramic Society*, 32: 2623–2632, (2012)
- [3] Wolfe D. E. and Singh J., "Titanium carbide coatings deposited by reactive ion beam-assisted, electron beam–physical vapor deposition", *Surface and Coating Technology*, 124: 142–153, (2000)
- [4] Khor, K. A., Dong, Z. L. and Gu, Y. W., "Plasma sprayed functionally graded thermal barrier coatings", *Material Letters*, 38: 437–444 (1999)
- [5] Sampath S., Herman H., Shimoda N. and Saito T., "Thermal spray processing of FGMs", *MRS Bulletin*, 20: 27–31 (1995)
- [6] Kaysser W.A. and Ilchner B., "FGM research activities in Europe", *MRS Bulletin*, 20: 22–26, (1995)
- [7] Shi D., Lin Y. and Ovaert T.C., "Indentation of an orthotropic half-space by a rigid ellipsoidal indenter", *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 125: 223–231, (2003)
- [8] Swanson S.R., "Hertzian contact of orthotropic materials", *International Journal of Solids and Structures*, 41: 1945–1959, (2004)
- [9] Rodriguez N.V., Masen M.A. and Schipper D.J., "A contact model for orthotropic viscoelastic materials", *International Journal of Mechanical Sciences*, 74: 91–98, (2013)
- [10] Dong X.Q., Zhou Y.T., Wang L.M., Ding S.H. and Park, J.B., "Stress state of two collinear stamps over the surface of orthotropic materials", *Archive of Applied Mechanics*, 84: 639–656, (2014)
- [11] Zhou Y.T., Lee K.Y. and Jang Y.H., "Indentation theory on orthotropic materials subjected to a frictional moving punch", *Archives of Mechanics*, 66: 71–94, (2014)
- [12] Zhou Y.T. and Lee K.Y., "Exact solutions of a new 2D frictionless contact model for orthotropic piezoelectric materials indented by a rigid sliding punch", *Philosophical Magazine*, 92: 1937–1965, (2012)
- [13] Guler M.A., "Closed-form solution of the two-dimensional sliding frictional contact problem for an orthotropic medium", *International Journal of Mechanical Sciences*, 87:72–88, (2014)
- [14] Kucuksucu A., Guler M.A. and Avci A., "Mechanics of sliding frictional contact for a graded orthotropic half-plane", *Acta Mechanica*, 226: 3333–3374 (2015)
- [15] Guler M.A., Kucuksucu A., Yilmaz K.B. and Yildirim B., "On the analytical and finite element solution of plane contact problem of a rigid cylindrical punch sliding over a functionally graded orthotropic medium", *International Journal of Mechanical Sciences*, 120: 12–29, (2017)
- [16] Arslan O. and Dag S., "Contact mechanics problem between an orthotropic graded coating and a rigid punch of an arbitrary profile", *International Journal of Mechanical Sciences*, 135: 541–554, (2018)
- [17] Babilio E., "Dynamics of an axially functionally graded beam under axial load", *The European Physical Journal Special Topics*, 222: 1519–1539, (2013)
- [18] Baron C. and Naili S., "Propagation of elastic waves in a fluid-loaded anisotropic functionally graded waveguide: Application to ultrasound characterization", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127: 1307–1317, (2010)
- [19] Borrelli A., Horgan C. and Patria M. C., "Exponential decay of end effects in anti-plane shear for functionally graded piezoelectric materials", *Proceedings of the Royal Society of London A-Mathematical and Physical Sciences*, 460: 1193–1212, (2004)
- [20] Arslan O., "Computational contact mechanics analysis of laterally graded orthotropic half-planes", *World Journal of Engineering*, 14: 145–154, (2017)
- [21] Dag S., Guler M.A., Yildirim B. and Ozatag A.C., "Frictional Hertzian contact between a laterally graded elastic medium and a rigid circular stamp", *Acta Mechanica*, 224, 1773–1789, (2013)
- [22] Dag S., "Consideration of spatial variation of the friction coefficient in contact mechanics analysis of laterally graded materials", *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 96: 121–36, (2016)
- [23] Khajehtourian R., Adibnazari S. and Tash, S., "The influence of grain size and grain size distribution on sliding frictional contact in laterally graded materials", *Applied Mechanics and Materials*, 157: 964–969, (2012)
- [24] Dag S. and Erdogan F., "A surface crack in a graded medium loaded by a sliding rigid stamp", *Engineering Fracture Mechanics*, 69: 1729–1751, (2002)
- [25] Hills D.A. and Nowell D., "Mechanics of fretting fatigue", *Kluwer Academic Publishers*, Netherlands, (1994)
- [26] Vadivuchezhian K., Sundar S. and Murthy H., "Effect of variable friction coefficient on contact tractions", *Tribology International*, 44: 1433–1442, (2011)
- [27] Ren L. and Zhang Y., "Sliding contact fracture of dental ceramics: Principles and validation", *Acta Biomaterialia*, 10: 3243–3253, (2014)
- [28] Ballard P., "Steady sliding frictional contact problem for a 2d elastic half-space with a discontinuous friction coefficient and related stress singularities" *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 97: 225–259, (2016)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Monge hypersurfaces in euclidean 4-space with density

## Yoğunluklu öklidyen 4-uzayında monge hiperyüzeyleri

Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa ALTIN<sup>1</sup>, Ahmet KAZAN<sup>2</sup>, H. Bayram KARADAĞ<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-5544-5910

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-1959-6102

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0001-6474-877X

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Altın M., Kazan A. ve Karadağ H. B., “Monge hypersurfaces in euclidean 4-space with density”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 207-214, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.634175

# Yoğunluklu Öklidyen 4-Uzayında Monge Hiperyüzeyleri

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Mustafa ALTIN<sup>1</sup>, Ahmet KAZAN<sup>2\*</sup>, H. Bayram KARADAĞ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Technical Sciences Vocational School, Bingol University, Bingol, Turkey

<sup>2</sup>Doğuşehir Vahap Küçük Vocational School of Higher Education, Department of Computer Technologies, Malatya Turgut Özal University, Turkey

<sup>3</sup>Faculty of Arts and Sciences, Department of Mathematics, Inonu University, Turkey

(Geliş/Received : 17.10.2019 ; Kabul/Accepted : 31.10.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, ilk olarak 4-boyutlu Öklidyen uzayında bir Monge hiperyüzeyinin ortalama ve Gaussian eğriliklerini verdik. Ardından, farklı yoğunluklara sahip  $E^4$  uzayında Monge hiperyüzeylerini çalıştık. Bu bağlamda,  $\alpha, \beta, \gamma$  ve  $\mu$  hepsi aynı anda sıfır olmayan sabitler olmak üzere,  $e^{\alpha x + \beta y + \gamma z + \mu t}$  (lineer yoğunluk) ve  $e^{\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2 + \mu t^2}$  yoğunluklu  $E^4$  uzayında ağırlıklı minimal ve ağırlıklı flat Monge hiperyüzeylerini  $\alpha, \beta, \gamma$  ve  $\mu$  sabitlerinin farklı seçimleri yardımıyla elde ettik.

**Anahtar Kelimeler:** Yoğunluklu manifold, ağırlıklı ortalama eğrilik, ağırlıklı gaussian eğriliği, monge yüzeyleri.

# Monge Hypersurfaces in Euclidean 4-Space with Density

## ABSTRACT

In the present study, firstly we give the mean and Gaussian curvatures of a Monge hypersurface in 4-dimensional Euclidean space. After this, we study on Monge hypersurfaces in  $E^4$  with different densities. In this context, we obtain the weighted minimal and weighted flat Monge hypersurfaces in  $E^4$  with densities  $e^{\alpha x + \beta y + \gamma z + \mu t}$  (linear density) and  $e^{\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2 + \mu t^2}$  with the aid of different choices of constants  $\alpha, \beta, \gamma$  and  $\mu$ , where  $\alpha, \beta, \gamma$  and  $\mu$  are not all zero constants.

**Keywords:** Manifold with density, weighted mean curvature, weighted gaussian curvature, monge hypersurfaces

## 1. INTRODUCTION

Minimal and flat surfaces have long been an important topic of study by mathematicians and other scientists. When we focus on the studies on this subject, some of these studies can be given as follows: In the first two decades of 1900s, Moore has studied rotational surfaces and rotational surfaces with constant curvature in four-dimensional space and he has given some relations for them, [1,2]. Moor's studies have examined by Ganchev and Milousheva in Minkowski 4-space and some relations have been expressed, [7]. In [3], complete hypersurfaces in  $\mathbb{R}^4$  with constant mean curvature and constant scalar curvature have been classified. In [5,6], authors have studied generalized rotational surfaces and translation surfaces in 4-dimensional Euclidean surfaces and they have investigated curvature properties of these surfaces and they have given some examples for them. Also authors have proved that, a translation surface is flat if and only if it is a hyperplane or a hypercylinder. Moruz and Mouteanu have considered hypersurfaces in  $\mathbb{R}^4$  defined as the sum of a curve and a surface whose mean

curvature vanishes in [8]. Yoon has investigated the rotational surfaces with finite type Gauss map in

Euclidean 4-space. He has proved that, the Gauss map is of finite type if and only if rotational surface is a Clifford torus [4]. Dursun and Turgay have studied general rotational surfaces in  $E^4$  whose meridian curves lie in two-dimensional planes and they have found all minimal general rotational surfaces by solving the differential equation that characterizes minimal general rotational surfaces. Also, they have determined all pseudo-umbilical general rotational surfaces in  $E^4$ , [9]. Kahraman and Yaylı have studied Bost invariant surfaces with pointwise 1-type Gauss map in  $E_1^4$  and they have generalized rotational surfaces of pointwise 1-type Gauss map in  $E_2^4$  [10,11]. Güler and et al have defined helicoidal hypersurface with the Laplace-Beltrami operator in four space, [12]. Also, Güler and et al have studied Gauss map and the third Laplace-Beltrami operator of the rotational hypersurface in 4-space, [13]. Since, the curvature of a curve and the mean curvature of an n-dimensional hypersurface are important invariants for curves and surfaces, many authors have studied these notions for different types of curves and surfaces for a long time in

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : ahmet.kazan@inonu.edu.tr



different spaces, such as Euclidean, Minkowski, Galilean and pseudo-Galilean spaces.

Now, let us recall some fundamental notions in Euclidean 4-space.

Let  $\vec{x} = (x_1, y_1, z_1, t_1)$ ,  $\vec{y} = (x_2, y_2, z_2, t_2)$  and  $\vec{z} = (x_3, y_3, z_3, t_3)$  be three vectors in  $E^4$ . Then, the inner product and vector product of these vectors are given by

$$\langle \vec{x}, \vec{y} \rangle = x_1x_2 + y_1y_2 + z_1z_2 + t_1t_2 \tag{1.1}$$

and

$$\vec{x} \times \vec{y} \times \vec{z} = \det \begin{pmatrix} e_1 & e_2 & e_3 & e_4 \\ x_1 & y_1 & z_1 & t_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & t_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 & t_3 \end{pmatrix}, \tag{1.2}$$

respectively. If

$$X: E^3 \rightarrow E^4, (u_1, u_2, u_3) \rightarrow X(u_1, u_2, u_3) \tag{1.3}$$

$= (X_1(u_1, u_2, u_3), X_2(u_1, u_2, u_3), X_3(u_1, u_2, u_3), X_4(u_1, u_2, u_3))$  is a hypersurface in Euclidean 4-space  $E^4$ , then the normal vector field, the matrix forms of the first and second fundamental forms are

$$N = \frac{X_{u_1} \times X_{u_2} \times X_{u_3}}{\|X_{u_1} \times X_{u_2} \times X_{u_3}\|} \tag{1.4}$$

$$g_{ij} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix} \tag{1.5}$$

and

$$h_{ij} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}, \tag{1.6}$$

respectively. Here,  $g_{ij} = \langle X_{u_i}, X_{u_j} \rangle$ ,  $h_{ij} = \langle X_{u_i u_j}, N \rangle$ ,

$$X_{u_i} = \frac{\partial X}{\partial u_i}, X_{u_i u_j} = \frac{\partial^2 X}{\partial u_i \partial u_j}, \{i, j\} \in \{1, 2, 3\}.$$

Also, the shape operator of the hypersurface (1.3) is

$$S = (a_{ij}) = (h_{ij}) \cdot (g_{ij})^{-1}, \tag{1.7}$$

where  $(g_{ij})^{-1}$  is the inverse matrix of  $(g_{ij})$ .

With the aid of (1.5)-(1.7), the Gaussian curvature and mean curvature of a hypersurface in  $E^4$  are given by

$$K = \frac{\det(h_{ij})}{\det(g_{ij})} \tag{1.8}$$

and

$$3H = iz(S), \tag{1.9}$$

respectively.

Furthermore, the notion of weighted manifold which is an important topic for geometers and physicists has been studied by many scientists, recently. Firstly, Gromov has introduced the notion of weighted mean curvature (or  $\varphi$ -mean curvature) of an n-dimensional hypersurface as

$$H_\varphi = H - \frac{1}{(n-1)} \frac{d\varphi}{dN}, \tag{1.10}$$

where  $H$  is the mean curvature and  $N$  is the unit normal vector field of the surface [14]. A hypersurface is called weighted minimal (or  $\varphi$ -minimal), if its weighted mean curvature vanishes.

Also, Corvin and et al have introduced the notion of generalized weighted Gaussian curvature on a manifold as

$$G_\varphi = G - \Delta \varphi, \tag{1.11}$$

where  $\Delta$  is the Laplacian operator [15]. A hypersurface is called weighted flat (or  $\varphi$ -flat), if its weighted Gaussian curvature vanishes.

After these definitions, lots of studies have been done by differential geometers about weighted manifolds, for instance [16-25].

## 2. MONGE HYPERSURFACES IN EUCLIDEAN 4-SPACE

In this section, we obtain the Gaussian and mean curvatures of a Monge hypersurface in Euclidean 4-space, by giving the normal vector field of it.

Let  $M$  be a surface in  $E^4$  given by

$$M: X(x, y, z) = (x, y, z, f(x, y, z)). \tag{2.1}$$

Then we call this surface as Monge hypersurface in Euclidean 4-space. For this surface, we have

$$X_x = (1, 0, 0, f_x), X_y = (0, 1, 0, f_y), X_z = (0, 0, 1, f_z)$$

$$X_{xx} = (0, 0, 0, f_{xx}), X_{xy} = (0, 0, 0, f_{xy}), \tag{2.2}$$

$$X_{xz} = (0, 0, 0, f_{xz}), X_{yy} = (0, 0, 0, f_{yy}),$$

$$X_{yz} = (0, 0, 0, f_{yz}), X_{zz} = (0, 0, 0, f_{zz}),$$

where  $X_i = \frac{\partial X}{\partial i}$ ,  $X_{ij} = \frac{\partial^2 X}{\partial i \partial j}$ ,  $f_i = \frac{\partial f}{\partial i}$ ,  $f_{ij} = \frac{\partial^2 f}{\partial i \partial j}$ ,  $\{i, j\} \in \{x, y, z\}$ . From (2.2),

$$X_x \times X_y \times X_z = \begin{vmatrix} e_1 & e_2 & e_3 & e_4 \\ 1 & 0 & 0 & f_x \\ 0 & 1 & 0 & f_y \\ 0 & 0 & 1 & f_z \end{vmatrix} = (f_x, f_y, f_z, -1) \tag{2.3}$$

and so, from (1.2) and (1.4) the normal vector field of the surface (2.1) is obtained as

$$N = \frac{(f_x, f_y, f_z, -1)}{\sqrt{1+f_x^2+f_y^2+f_z^2}} \tag{2.4}$$

Also from (1.6), the matrix form of the second fundamental form of the surface (2.1) is

$$(h_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{1+f_x^2+f_y^2+f_z^2}} \begin{bmatrix} -f_{xx} & -f_{xy} & -f_{xz} \\ -f_{xy} & -f_{yy} & -f_{yz} \\ -f_{xz} & -f_{yz} & -f_{zz} \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

and its determinant is

$$\det(h_{ij}) = \frac{-f_{xx}f_{yy}f_{zz} - 2f_{xy}f_{yz}f_{xz} + f_{xx}f_{yz}^2 + f_{yy}f_{xz}^2 + f_{zz}f_{xy}^2}{(1+f_x^2+f_y^2+f_z^2)^{3/2}}. \tag{2.6}$$

Now, we obtain the matrix of the metric  $g_{ij}$ , its determinant and inverse as

$$g_{ij} = \begin{bmatrix} 1+f_x^2 & f_x f_y & f_x f_z \\ f_x f_y & 1+f_y^2 & f_y f_z \\ f_x f_z & f_y f_z & 1+f_z^2 \end{bmatrix}, \tag{2.7}$$

$$\det(g_{ij}) = (1+f_x^2) [(1+f_y^2)(1+f_z^2) - (f_y f_z)^2] - f_x f_y [f_x f_y (1+f_z^2) - f_x f_y f_z^2]$$

$$+f_x f_z [f_x f_z f_y^2 - (1 + f_y^2) f_x f_z] = 1 + f_x^2 + f_y^2 + f_z^2 \tag{2.8}$$

and

$$(g_{ij})^{-1} = \frac{1}{1+f_x^2+f_y^2+f_z^2} \begin{bmatrix} 1+f_y^2+f_z^2 & -f_x f_y & -f_x f_z \\ -f_x f_y & 1+f_x^2+f_z^2 & -f_y f_z \\ -f_x f_z & -f_y f_z & 1+f_x^2+f_y^2 \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

respectively. Hence, using (2.6) and (2.8) in (1.8), we obtain the Gaussian curvature of the surface (2.1) as

$$K = \frac{-f_{xx} f_{zz} f_{yy} - 2(f_{xy} f_{yz} f_{xz}) + f_{xx} (f_{yz})^2 + f_{yy} (f_{xz})^2 + f_{zz} (f_{xy})^2}{(1+f_x^2+f_y^2+f_z^2)^{5/2}} \tag{2.10}$$

Let we take  $(a_{ij}) = (h_{ij}) \times (g_{ij})^{-1}$ . Then, since

$$(a_{ij}) = \tag{2.11}$$

$$\frac{1}{(1+f_x^2+f_y^2+f_z^2)^{3/2}} \begin{bmatrix} -f_{xx} & -f_{xy} & -f_{xz} \\ -f_{xy} & -f_{yy} & -f_{yz} \\ -f_{xz} & -f_{yz} & -f_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+f_x^2+f_z^2 & -f_x f_y & -f_x f_z \\ -f_x f_y & 1+f_x^2+f_z^2 & -f_y f_z \\ -f_x f_z & -f_y f_z & 1+f_x^2+f_y^2 \end{bmatrix}$$

from (1.9), we obtain the mean curvature of the surface (2.1) as

$$H = \frac{\begin{bmatrix} -f_{xx}(1+f_y^2+f_z^2) - f_{yy}(1+f_x^2+f_z^2) - f_{zz}(1+f_x^2+f_y^2) \\ + 2(f_{xy} f_x f_y + f_{xz} f_x f_z + f_{yz} f_y f_z) \end{bmatrix}}{3(1+f_x^2+f_y^2+f_z^2)^{3/2}} \tag{2.12}$$

### 3. MONGE HYPERSURFACES IN E<sup>4</sup> WITH LINEAR DENSITY

In the first subsection of this section, we investigate the weighted minimal Monge hypersurfaces in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\alpha x + \beta y + \gamma z + \mu t}$  and in the second subsection of this section, we investigate the weighted flat Monge hypersurfaces in  $E^4$  with this density.

#### 3.1. Weighted Minimal Monge Hypersurfaces in E<sup>4</sup> with Linear Density

Let  $M$  be a Monge hypersurface given by (2.1) in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\alpha x + \beta y + \gamma z + \mu t}$ , where  $\alpha, \beta, \gamma$  and  $\mu$  are not all zero constants. Then from (1.10), the weighted mean curvature of this surface is obtained as

$$H_\varphi = \frac{\begin{bmatrix} -f_{xx}(1+f_y^2+f_z^2) - f_{yy}(1+f_x^2+f_z^2) - f_{zz}(1+f_x^2+f_y^2) + 2(f_{xy} f_x f_y + f_{xz} f_x f_z + f_{yz} f_y f_z) - (\alpha f_x + \beta f_y + \gamma f_z - \mu)(1+f_x^2+f_y^2+f_z^2) \end{bmatrix}}{3(1+f_x^2+f_y^2+f_z^2)^{3/2}} \tag{3.1}$$

So, we have

**Proposition 1.** *Let  $M: X(x, y, z) = (x, y, z, f(x, y, z))$  be a Monge hypersurface in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\alpha x + \beta y + \gamma z + \mu t}$ , where  $\alpha, \beta, \gamma$  and  $\mu$  are not all zero constants. Then, this surface is weighted minimal if and only if*

$$2(f_{xy} f_x f_y + f_{xz} f_x f_z + f_{yz} f_y f_z) = f_{xx}(1+f_y^2+f_z^2) + f_{yy}(1+f_x^2+f_z^2) + f_{zz}(1+f_x^2+f_y^2) + (\alpha f_x + \beta f_y + \gamma f_z - \mu)(1+f_x^2+f_y^2+f_z^2) \tag{3.2}$$

satisfies.

Now, let we take

$$f(x, y, z) = h(x) + g(y) + m(z),$$

where  $h, g$  and  $m$  are  $C^2$ -differentiable functions. Thus, we have

$$\begin{aligned} f_x &= h'(x), \quad f_y = g'(y), \quad f_z = m'(z), \\ f_{xx} &= h''(x), \quad f_{xy} = 0, \quad f_{xz} = 0, \\ f_{yy} &= g''(y), \quad f_{yz} = 0, \quad f_{zz} = m''(z). \end{aligned} \tag{3.3}$$

Using (3.3) in (3.1), the weighted mean curvature of the surface (2.1) is obtained as

$$H_\varphi = \frac{\begin{bmatrix} -h''(x)(1+g'(y)^2+m'(z)^2) \\ -g''(y)(1+h'(x)^2+m'(z)^2) \\ -m''(z)(1+h'(x)^2+g'(y)^2) - (\alpha h'(x) + \beta g'(y) + \gamma m'(z) - \mu)(1+h'(x)^2+g'(y)^2+m'(z)^2) \end{bmatrix}}{3(1+h'(x)^2+g'(y)^2+m'(z)^2)^{3/2}} \tag{3.4}$$

**Proposition 2.** *Let  $M: X(x, y, z) = (x, y, z, h(x) + g(y) + m(z))$  be a Monge hypersurface in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\alpha x + \beta y + \gamma z + \mu t}$ , where  $\alpha, \beta, \gamma$  and  $\mu$  are not all zero constants. Then, this surface is weighted minimal if and only if*

$$\begin{aligned} 0 &= h''(x)(1+g'(y)^2+m'(z)^2) + g''(y)(1+h'(x)^2+m'(z)^2) + m''(z)(1+h'(x)^2+g'(y)^2) + (\alpha h'(x) + \beta g'(y) + \gamma m'(z) - \mu)(1+h'(x)^2+g'(y)^2+m'(z)^2) \end{aligned} \tag{3.5}$$

satisfies.

Next, we'll obtain the weighted minimal Monge hypersurfaces in  $E^4$  with density  $e^{\alpha x + \beta y + \gamma z + \mu t}$  for different choices of the not all zero constants  $\alpha, \beta, \gamma$  and  $\mu$ .

We note that, throughout this study we consider  $k_i$  and  $\lambda_i, i \in \mathbb{N}^+$ , are real constants.

**Case 1.** Let the density be  $e^{\alpha x}$ :

In this case, let us consider the Monge hypersurface

$$M: X(x, y, z) = (x, y, z, h(x) + g(y) + m(z))$$

in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\alpha x}$ . Then, this surface is weighted minimal if and only if

$$\begin{aligned} 0 &= h''(x)(1+g'(y)^2+m'(z)^2) + g''(y)(1+h'(x)^2+m'(z)^2) + m''(z)(1+h'(x)^2+g'(y)^2) + \alpha h'(x)(1+h'(x)^2+g'(y)^2+m'(z)^2) \end{aligned} \tag{3.6}$$

satisfies. Here, by obtaining some special solutions for the equation (3.6), we'll construct the weighted minimal Monge hypersurfaces in  $E^4$  with linear density  $e^{\alpha x}$ .

Firstly, let us take the functions  $g(y)$  and  $m(z)$  are linear, i.e.  $g(y) = k_1 y + k_2, m(z) = k_3 z + k_4$ .

Then, the equation (3.6) becomes

$$\begin{aligned} h''(x)(1+(k_1)^2+(k_3)^2) &= -\alpha h'(x)(1+(h')^2+(k_1)^2+(k_3)^2). \end{aligned} \tag{3.7}$$

From (3.7),

$$\frac{h''(1+(k_1)^2+(k_3)^2)}{\alpha h'(1+(h')^2+(k_1)^2+(k_3)^2)} = -1$$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \frac{h''}{h'} - \frac{h''h'}{(h')^2 + 1 + (k_1)^2 + (k_3)^2} = -\alpha \\ &\Rightarrow \left( \ln|h'| - \frac{1}{2} \ln|(h')^2 + 1 + (k_1)^2 + (k_3)^2| \right)' = -\alpha \\ &\Rightarrow \ln \left| \frac{h'}{\sqrt{(h')^2 + 1 + (k_1)^2 + (k_3)^2}} \right| = -\alpha x + \lambda_1 \\ &\Rightarrow \frac{h'}{\sqrt{(h')^2 + 1 + (k_1)^2 + (k_3)^2}} = e^{-\alpha x + \lambda_1} \\ &\Rightarrow h' = e^{-\alpha x + \lambda_1} \sqrt{(h')^2 + 1 + (k_1)^2 + (k_3)^2} \\ &\Rightarrow (h')^2 = e^{-2\alpha x + 2\lambda_1} ((h')^2 + 1 + (k_1)^2 + (k_3)^2) \\ &\Rightarrow (1 - e^{-2\alpha x + 2\lambda_1})(h')^2 = e^{-2\alpha x + 2\lambda_1} (1 + (k_1)^2 + (k_3)^2) \\ &\Rightarrow h' = \frac{\sqrt{1 + (k_1)^2 + (k_3)^2} \cdot e^{-\alpha x + \lambda_1}}{\sqrt{1 - (e^{-\alpha x + \lambda_1})^2}} \\ &\Rightarrow h(x) = \frac{\sqrt{1 + (k_1)^2 + (k_3)^2} \arctan(e^{-\lambda_1} \sqrt{e^{2\alpha x} - e^{2\lambda_1}})}{\alpha} + \lambda_2. \end{aligned} \tag{3.8}$$

Thus,

$$f(x, y, z) = \frac{\sqrt{1 + (k_1)^2 + (k_3)^2} \arctan(e^{-\lambda_1} \sqrt{e^{2\alpha x} - e^{2\lambda_1}})}{\alpha} + k_1 y + k_3 z + k_2 + k_4 + \lambda_2$$

is a solution of (3.7).

So, we can give the following Theorem:

**Theorem 1.** The weighted minimal Monge hypersurface in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\alpha x}$  for  $(\alpha \neq 0) \in \mathbb{R}$  can be parametrized by

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_1 y + k_3 z + k + \frac{\sqrt{1 + (k_1)^2 + (k_3)^2} \arctan(e^{-\lambda_1} \sqrt{e^{2\alpha x} - e^{2\lambda_1}})}{\alpha}), \tag{3.9}$$

where  $k = k_2 + k_4 + \lambda_2$ .

Secondly, taking the functions  $h(x)$  and  $m(z)$  are linear, i.e.  $h(x) = k_5 x + k_6, m(z) = k_3 z + k_4$ , from (3.6), we have

$$g''(y)(1 + (k_5)^2 + (k_3)^2) = -\alpha k_5 (1 + (g'(y))^2 + (k_5)^2 + (k_3)^2). \tag{3.10}$$

Solving this equation, we reach that

$$\begin{aligned} g'' &= -\alpha k_5 \left( 1 + \frac{(g')^2}{1 + (k_5)^2 + (k_3)^2} \right) \\ &\Rightarrow \frac{g''}{1 + \frac{(g')^2}{1 + (k_5)^2 + (k_3)^2}} = -\alpha k_5 \\ &\Rightarrow \frac{g''}{\sqrt{1 + (k_5)^2 + (k_3)^2}} = \frac{-\alpha k_5}{\sqrt{1 + (k_5)^2 + (k_3)^2}} \\ &\Rightarrow \arctan \left( \frac{g'}{\sqrt{1 + (k_5)^2 + (k_3)^2}} \right) \\ &= \frac{-\alpha k_5 y}{\sqrt{1 + (k_5)^2 + (k_3)^2}} + \lambda_3 \\ &\Rightarrow g' = \sqrt{1 + (k_5)^2 + (k_3)^2} \tan \left( \frac{-\alpha k_5 y}{\sqrt{1 + (k_5)^2 + (k_3)^2}} + \lambda_3 \right) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow g(y) = \frac{\ln(\cos(\frac{\alpha k_5 y}{\sqrt{1 + (k_5)^2 + (k_3)^2}} + \lambda_3))(1 + (k_5)^2 + (k_3)^2)}{\alpha k_5} + \lambda_4. \tag{3.11}$$

Hence, we have

**Theorem 2.** The weighted minimal Monge hypersurface in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\alpha x}$  for  $(\alpha \neq 0) \in \mathbb{R}$  can be parametrized by

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_5 x + k_3 z + k + \frac{\ln(\cos(\frac{\alpha k_5 y}{\sqrt{1 + (k_5)^2 + (k_3)^2}} + \lambda_3))(1 + (k_5)^2 + (k_3)^2)}{\alpha k_5}), \tag{3.12}$$

where  $k = k_4 + k_6 + \lambda_4$ .

And now, taking the functions  $h(x)$  and  $g(y)$  are linear, i.e.  $h(x) = k_5 x + k_6, g(y) = k_1 y + k_2$ , from (3.6), we have

$$m''(z) = -\alpha k_5 \left( 1 + \frac{m'(z)^2}{1 + (k_5)^2 + (k_1)^2} \right). \tag{3.13}$$

Solving (3.13) with the same procedure as above, we have

$$m(z) = \frac{\ln(\cos(\frac{\alpha k_5 z}{\sqrt{1 + (k_5)^2 + (k_1)^2}} + \lambda_5))(1 + (k_5)^2 + (k_1)^2)}{\alpha k_5} + \lambda_6. \tag{3.14}$$

So, we get

**Theorem 3.** The weighted minimal Monge hypersurface in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\alpha x}$  for  $(\alpha \neq 0) \in \mathbb{R}$  can be parametrized by

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_5 x + k_1 y + k + \frac{\ln(\cos(\frac{\alpha k_5 z}{\sqrt{1 + (k_5)^2 + (k_1)^2}} + \lambda_5))(1 + (k_5)^2 + (k_1)^2)}{\alpha k_5}), \tag{3.15}$$

where  $k = k_6 + k_2 + \lambda_6$ .

**Case 2.** Let the density be  $e^{\beta y}$ :

In this case, let us consider the Monge hypersurface

$$M: X(x, y, z) = (x, y, z, h(x) + g(y) + m(z))$$

in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\beta y}$ . Then, this surface is weighted minimal if and only if

$$\begin{aligned} 0 &= h''(x)(1 + g'(y)^2 + m'(z)^2) \\ &+ g''(y)(1 + h'(x)^2 + m'(z)^2) \\ &+ m''(z)(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2) \\ &+ \beta g'(y)(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2 + m'(z)^2) \end{aligned} \tag{3.16}$$

satisfies. With the same procedure as first case, one can obtain the following Theorem:

**Theorem 4.** The weighted minimal Monge hypersurface in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\beta y}$  for  $(\beta \neq 0) \in \mathbb{R}$  can be parametrized by

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_5 x + k_1 y + k + \frac{\ln(\cos(\frac{\beta k_1 z}{\sqrt{1 + (k_5)^2 + (k_1)^2}} + \lambda_7))(1 + (k_5)^2 + (k_1)^2)}{\beta k_1}), \tag{3.17}$$

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_1 y + k_3 z + l + \frac{\ln(\cos(\frac{\beta k_1 x}{\sqrt{1 + (k_3)^2 + (k_1)^2}} + \lambda_9))(1 + (k_3)^2 + (k_1)^2)}{\beta k_1}) \tag{3.18}$$

or

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_5x + k_3z + n + \frac{\sqrt{(1+(k_5)^2+(k_3)^2)} \arctan(e^{-\lambda_{11}\sqrt{e^{2\beta y} - e^{2\lambda_{11}}}})}{\beta}), \quad (3.19)$$

where  $k = k_6 + k_2 + \lambda_8$ ,  $l = k_2 + k_4 + \lambda_{10}$  and  $n = k_6 + k_4 + \lambda_{12}$ .

**Case 3.** Let the density be  $e^{\gamma z}$ :

In this case, let us consider the Monge hypersurface

$$M: X(x, y, z) = (x, y, z, h(x) + g(y) + m(z))$$

in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\gamma z}$ . Then, this surface is weighted minimal if and only if

$$\begin{aligned} 0 &= h''(x)(1 + g'(y)^2 + m'(z)^2) \\ &+ g''(y)(1 + h'(x)^2 + m'(z)^2) \\ &+ m''(z)(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2) \\ &+ \gamma m'(z)(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2 + m'(z)^2) \end{aligned} \quad (3.20)$$

satisfies. Hence, from (3.20) we have

**Theorem 5.** The weighted minimal Monge hypersurface in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\gamma z}$  for  $(\gamma \neq 0) \in \mathbb{R}$  can be parametrized by

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_1y + k_3z + k + \frac{\ln(\cos(\frac{\gamma k_3 x}{\sqrt{1+(k_3)^2+(k_1)^2}} + \lambda_{13})) (1+(k_3)^2+(k_1)^2)}{\gamma k_3}), \quad (3.21)$$

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_5x + k_3z + l + \frac{\ln(\cos(\frac{\gamma k_3 y}{\sqrt{1+(k_3)^2+(k_1)^2}} + \lambda_{15})) (1+(k_3)^2+(k_5)^2)}{\gamma k_3}) \quad (3.22)$$

or

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_5x + k_1y + n + \frac{\sqrt{(1+(k_5)^2+(k_1)^2)} \arctan(e^{-\lambda_{17}\sqrt{e^{2\gamma z} - e^{2\lambda_{17}}}})}{\gamma}), \quad (3.23)$$

where  $k = k_2 + k_4 + \lambda_{14}$ ,  $l = k_6 + k_4 + \lambda_{16}$  and  $n = k_6 + k_2 + \lambda_{18}$ .

**Case 4.** Let the density be  $e^{\mu t}$ :

Here, let us consider the Monge hypersurface

$$M: X(x, y, z) = (x, y, z, h(x) + g(y) + m(z))$$

in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\mu t}$ . Then, this surface is weighted minimal if and only if

$$\begin{aligned} 0 &= h''(x)(1 + g'(y)^2 + m'(z)^2) \\ &+ g''(y)(1 + h'(x)^2 + m'(z)^2) \\ &+ m''(z)(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2) \\ &- \mu(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2 + m'(z)^2) \end{aligned} \quad (3.24)$$

satisfies. Thus,

**Theorem 6.** The weighted minimal Monge hypersurface in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\mu t}$  for  $(\mu \neq 0) \in \mathbb{R}$  can be parametrized by

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_1y + k_3z + k - \frac{\ln(\cos(\frac{x\mu}{\sqrt{1+(k_3)^2+(k_1)^2}} + \lambda_{19})) (1+(k_3)^2+(k_1)^2)}{\mu}), \quad (3.25)$$

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_5x + k_3z + l - \frac{\ln(\cos(\frac{y\mu}{\sqrt{1+(k_5)^2+(k_1)^2}} + \lambda_{21})) (1+(k_5)^2+(k_1)^2)}{\mu}) \quad (3.26)$$

or

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_5x + k_1y + n - \frac{\ln(\cos(\frac{z\mu}{\sqrt{1+(k_3)^2+(k_5)^2}} + \lambda_{23})) (1+(k_3)^2+(k_5)^2)}{\mu}), \quad (3.27)$$

where  $k = k_2 + k_4 + \lambda_{20}$ ,  $l = k_6 + k_4 + \lambda_{22}$  and  $n = k_6 + k_2 + \lambda_{24}$ .

### 3.2. Weighted Flat Monge Hypersurfaces in $E^4$ with Linear Density

From (1.11), the weighted Gaussian curvature of the Monge hypersurface in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\alpha x + \beta y + \gamma z + \mu t}$  is obtained as

$$K_\varphi = - \frac{h''(x)g''(y)m''(z)}{(1+h'(x)^2+g'(y)^2+m'(z)^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (3.28)$$

So from (3.28), we can state the following theorems:

**Theorem 7.** Let  $M: X(x, y, z) = (x, y, z, h(x) + g(y) + m(z))$  be a Monge hypersurface in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\alpha x + \beta y + \gamma z + \mu t}$ , where  $\alpha, \beta, \gamma$  and  $\mu$  are not all zero constants. If one of the functions  $h(x), g(y)$  and  $m(z)$  is linear, then  $M$  is weighted flat.

**Theorem 8.** If  $M: X(x, y, z) = (x, y, z, h(x) + g(y) + m(z))$  is a Monge hypersurface in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\alpha x + \beta y + \gamma z + \mu t}$ , where  $\alpha, \beta, \gamma$  and  $\mu$  are not all zero constants, then its weighted Gaussian curvature cannot be constant except for zero.

## 4. MONGE HYPERSURFACES IN $E^4$ WITH DENSITY $e^{\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2 + \mu t^2}$

In this section, we obtain the weighted minimal Monge hypersurfaces and give a characterization for the constancy of weighted Gaussian curvature of Monge hypersurfaces in  $E^4$  with density  $e^{\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2 + \mu t^2}$ .

### 4.1. Weighted Minimal Monge Hypersurfaces in $E^4$ with Density $e^{\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2 + \mu t^2}$

From (1.10) and (2.4), the weighted mean curvature of the Monge hypersurface

$$M: X(x, y, z) = (x, y, z, f(x, y, z))$$

in  $E^4$  with density  $e^{\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2 + \mu t^2}$  is obtained as

$$H_\varphi = \frac{\left\{ \begin{aligned} &-f_{xx}(1+f_y^2+f_z^2) - f_{yy}(1+f_x^2+f_z^2) \\ &+ f_{zz}(1+f_x^2+f_y^2) \\ &2(f_{xy}f_xf_y + f_{xz}f_xf_z + f_{yz}f_yf_z) - \\ &2(\alpha x f_x + \beta y f_y + \gamma z f_z - \mu f)(1+f_x^2+f_y^2+f_z^2) \end{aligned} \right\}}{3(1+f_x^2+f_y^2+f_z^2)^{3/2}}. \quad (4.1)$$

Thus, we get

**Proposition 3.** Let  $M: X(x, y, z) = (x, y, z, f(x, y, z))$  be a Monge hypersurface in Euclidean 4-space with density  $e^{\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2 + \mu t^2}$ , where  $\alpha, \beta, \gamma$  and  $\mu$  are not all zero

constants. Then, this surface is weighted minimal if and only if

$$2(f_{xy}f_xf_y + f_{xz}f_xf_z + f_{yz}f_yf_z) = f_{xx}(1 + f_y^2 + f_z^2) + f_{yy}(1 + f_x^2 + f_z^2) + f_{zz}(1 + f_x^2 + f_y^2) + (\alpha f_x + \beta f_y + \gamma f_z - \mu f)(1 + f_x^2 + f_y^2 + f_z^2) \quad (4.2)$$

satisfies.

Here, if we take  $f(x, y, z) = h(x) + g(y) + m(z)$ , where  $h, g$  and  $m$  are  $C^2$ -differentiable functions, then using (3.3) in (4.2), the weighted mean curvature of the Monge hypersurface

$$M: X(x, y, z) = (x, y, z, h(x) + g(y) + m(z))$$

is obtained as

$$H_\varphi = \frac{\begin{pmatrix} -h''(x)(1+g'(y)^2+m'(z)^2) \\ -g''(y)(1+h'(x)^2+m'(z)^2) \\ -m''(z)(1+h'(x)^2+g'(y)^2) \\ -2(\alpha xh'(x)+\beta yg'(y)+\gamma zm'(z))- \\ \mu(h(x)+g(y)+m(z))(1+h'(x)^2+g'(y)^2+m'(z)^2) \end{pmatrix}}{3(1+h'(x)^2+g'(y)^2+m'(z)^2)^{3/2}}. \quad (4.3)$$

**Proposition 4.** Let  $M: X(x, y, z) = (x, y, z, h(x) + g(y) + m(z))$  be a Monge hypersurface in Euclidean 4-space with density  $e^{\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2 + \mu t^2}$ , where  $\alpha, \beta, \gamma$  and  $\mu$  are not all zero constants. Then, this surface is weighted minimal if and only if

$$0 = h''(x)(1 + g'(y)^2 + m'(z)^2) + g''(y)(1 + h'(x)^2 + m'(z)^2) + m''(z)(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2) + 2(\alpha xh'(x) + \beta yg'(y) + \gamma zm'(z)) - \mu(h(x) + g(y) + m(z))(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2 + m'(z)^2) \quad (4.4)$$

satisfies.

Now, we'll obtain the weighted minimal Monge hypersurfaces in  $E^4$  with density  $e^{\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2 + \mu t^2}$  for different choices of the not all zero constants  $\alpha, \beta, \gamma$  and  $\mu$ .

**Case 1.** Let the density be  $e^{\alpha x^2}$ :

In this case, let us consider the Monge hypersurface

$$M: X(x, y, z) = (x, y, z, h(x) + g(y) + m(z))$$

in Euclidean 4-space with density  $e^{\alpha x^2}$ . Then, this surface is weighted minimal if and only if

$$0 = h''(x)(1 + g'(y)^2 + m'(z)^2) + g''(y)(1 + h'(x)^2 + m'(z)^2) + m''(z)(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2) + 2\alpha xh'(x)(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2 + m'(z)^2) \quad (4.5)$$

satisfies. Here, by obtaining some special solutions for the equation (4.5), we'll construct the weighted minimal Monge hypersurfaces in  $E^4$  with density  $e^{\alpha x^2}$ .

Firstly, let us take the functions  $g(y)$  and  $m(z)$  are linear, i.e.  $g(y) = k_1y + k_2, m(z) = k_3z + k_4$ . Then, the equation (4.5) becomes

$$h''(1 + (k_1)^2 + (k_3)^2) = -2\alpha xh'(1 + (h')^2 + (k_1)^2 + (k_3)^2). \quad (4.6)$$

From (4.6), we have

$$\begin{aligned} \frac{h''(1 + (k_1)^2 + (k_3)^2)}{h'(1 + (h')^2 + (k_1)^2 + (k_3)^2)} &= -2\alpha x \\ \Rightarrow \frac{h''}{h'} - \frac{h''h'}{(h')^2 + 1 + (k_1)^2 + (k_3)^2} &= -2\alpha x \\ \Rightarrow \left( \ln|h'| - \frac{1}{2} \ln|h'^2 + 1 + (k_1)^2 + (k_3)^2| \right)' &= -2\alpha x \\ \Rightarrow \ln \left| \frac{h'}{\sqrt{(h')^2 + 1 + (k_1)^2 + (k_3)^2}} \right| &= -\alpha x^2 + \lambda_{25} \\ \Rightarrow \frac{h'}{\sqrt{(h')^2 + 1 + (k_1)^2 + (k_3)^2}} &= e^{-\alpha x^2 + \lambda_{25}} \\ \Rightarrow h' &= e^{-\alpha x^2 + \lambda_{25}} \sqrt{(h')^2 + 1 + (k_1)^2 + (k_3)^2} \\ \Rightarrow h' &= e^{-\alpha x^2 + \lambda_{25}} \sqrt{(h')^2 + 1 + (k_1)^2 + (k_3)^2} \\ \Rightarrow (h')^2 &= e^{-2\alpha x^2 + 2\lambda_{25}} ((h')^2 + 1 + (k_1)^2 + (k_3)^2) \\ \Rightarrow h' &= \frac{\sqrt{1 + (k_1)^2 + (k_3)^2} \cdot e^{-\alpha x^2 + \lambda_{25}}}{\sqrt{1 - (e^{-\alpha x^2 + \lambda_{25}})^2}} \\ \Rightarrow h &= \int \frac{\sqrt{1 + (k_1)^2 + (k_3)^2} \cdot e^{-\alpha x^2 + \lambda_{25}}}{\sqrt{1 - (e^{-\alpha x^2 + \lambda_{25}})^2}} dx. \quad (4.7) \end{aligned}$$

Thus,

$$f(x, y, z) = \int \frac{\sqrt{1 + (k_1)^2 + (k_3)^2} \cdot e^{-\alpha x^2 + e^{-\alpha x^2 + \lambda_{25}}}}{\sqrt{1 - (e^{-\alpha x^2 + n})^2}} dx + k_1y + k_3z + k_2 + k_4$$

is a solution of (4.6).

So, we can give the following Theorem:

**Theorem 9.** The weighted minimal Monge hypersurface in Euclidean 4-space with density  $e^{\alpha x^2}$  for  $(\alpha \neq 0) \in \mathbb{R}$  can be parametrized by

$$X(x, y, z) = (x, y, z, \int \frac{\sqrt{1 + (k_1)^2 + (k_3)^2} \cdot e^{-\alpha x^2 + \lambda_{25}}}{\sqrt{1 - (e^{-\alpha x^2 + \lambda_{25}})^2}} dx + k_1y + k_3z + k_2 + k_4). \quad (4.8)$$

Secondly, taking the functions  $h(x)$  and  $m(z)$  are linear, i.e.  $h(x) = k_5x + k_6, m(z) = k_3z + k_4$ , from (4.5), we have

$$g''(1 + (k_5)^2 + (k_3)^2) = -2\alpha xk_5(1 + (g')^2 + (k_5)^2 + (k_3)^2). \quad (4.9)$$

The equation (4.9) satisfies for  $k_5 = 0$  and  $g''(y) = 0$ .

Similarly, taking the functions  $h(x)$  and  $g(y)$  are linear, i.e.  $h(x) = k_5x + k_6, g(y) = k_1y + k_2$ , from (4.5), we have

$$m''(1 + (k_5)^2 + (k_1)^2) = -2\alpha xk_5(1 + (m')^2 + (k_5)^2 + (k_1)^2). \quad (4.10)$$

The equation (4.10) satisfies for  $k_5 = 0$  and  $m''(z) = 0$ .

So, we get

**Theorem 10.** The weighted minimal Monge hypersurface in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\alpha x^2}$  for  $(\alpha \neq 0) \in \mathbb{R}$  can be parametrized by

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_1y + k_3z + k), \tag{4.11}$$

where  $k = k_2 + k_4 + k_6$ .

**Case 2.** Let the density be  $e^{\beta y^2}$ :

In this case, let us consider the Monge hypersurface

$$M: X(x, y, z) = (x, y, z, h(x) + g(y) + m(z))$$

in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\beta y^2}$ . Then, this surface is weighted minimal if and only if

$$0 = h''(x)(1 + g'(y)^2 + m'(z)^2) + g''(y)(1 + h'(x)^2 + m'(z)^2) + m''(z)(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2) + 2\beta y g'(y)(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2 + m'(z)^2) \tag{4.12}$$

satisfies. With the same procedure as first case, one can obtain the following Theorem:

**Theorem 11.** The weighted minimal Monge hypersurface in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\beta y^2}$  for  $(\beta \neq 0) \in \mathbb{R}$  can be parametrized by

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_5x + k_3z + k_4 + k_6 + \int \frac{\sqrt{1+(k_5)^2+(k_3)^2} \cdot e^{-\beta y^2 + \lambda_{26}}}{\sqrt{1-(e^{-\beta y^2 + \lambda_{26}})^2}} dy) \tag{4.13}$$

or

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_5x + k_3z + k), \tag{4.14}$$

where  $k = k_2 + k_4 + k_6$ .

**Case 3.** Let the density be  $e^{\gamma z^2}$ :

Here, let us consider the Monge hypersurface

$$M: X(x, y, z) = (x, y, z, h(x) + g(y) + m(z))$$

in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\gamma z^2}$ . Then, this surface is weighted minimal if and only if

$$0 = h''(x)(1 + g'(y)^2 + m'(z)^2) + g''(y)(1 + h'(x)^2 + m'(z)^2) + m''(z)(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2) + 2\gamma m'(z)(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2 + m'(z)^2) \tag{4.15}$$

satisfies. Hence, we have

**Theorem 12.** The weighted minimal Monge hypersurface in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\gamma z^2}$  for  $(\gamma \neq 0) \in \mathbb{R}$  can be parametrized by

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_5x + k_1y + k_2 + k_6 + \int \frac{\sqrt{1+(k_5)^2+(k_1)^2} \cdot e^{-\gamma z^2 + \lambda_{27}}}{\sqrt{1-(e^{-\gamma z^2 + \lambda_{27}})^2}} dx) \tag{4.16}$$

or

$$X(x, y, z) = (x, y, z, k_5x + k_1y + k), \tag{4.17}$$

where  $k = k_2 + k_4 + k_6$ .

**Case 4.** Let the density be  $e^{\mu t^2}$ :

In this case, let us consider the Monge hypersurface

$$M: X(x, y, z) = (x, y, z, h(x) + g(y) + m(z))$$

in Euclidean 4-space with linear density  $e^{\mu t^2}$ . Then, this surface is weighted minimal if and only if

$$2\mu(h(x) + g(y) + m(z))(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2 + m'(z)^2)$$

$$= h''(x)(1 + g'(y)^2 + m'(z)^2) + g''(y)(1 + h'(x)^2 + m'(z)^2) + m''(z)(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2) \tag{4.18}$$

satisfies.

**4.2. The Constancy of Weighted Gaussian Curvature of Monge Hypersurfaces in  $E^4$  with Density  $e^{\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2 + \mu t^2}$**

From (1.11), the weighted Gaussian curvature of the Monge hypersurface in Euclidean 4-space with density  $e^{\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2 + \mu t^2}$  is obtained as

$$K_\varphi = \frac{\left( \frac{h''(x)g''(y)m''(z) - 2(\alpha + \beta + \gamma + \mu)(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2 + m'(z)^2)^{3/2}}{(1 + h'(x)^2 + g'(y)^2 + m'(z)^2)^{3/2}} \right)}{\tag{4.19}}$$

So from (4.19), we can state the following Theorem:

**Theorem 13.** Let  $M: X(x, y, z) = (x, y, z, h(x) + g(y) + m(z))$  be a Monge hypersurface in Euclidean 4-space with density  $e^{\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2 + \mu t^2}$ , where  $\alpha, \beta, \gamma$  and  $\mu$  are not all zero constants. If one of the functions  $h(x), g(y)$  and  $m(z)$  is linear and  $\alpha + \beta + \gamma + \mu = \frac{-r}{2}$ , then the weighted Gaussian curvature of  $M$  is constant  $r$ .

**5. CONCLUSION**

Surface theory has an important place in 4-dimensional spaces as in 3-dimensional spaces. So, in the present study, we consider the Monge hypersurfaces in Euclidean 4-space with different densities and obtain the weighted minimal and weighted flat Monge hypersurfaces in this space. We think that, the results which are obtained in this study are important for differential geometers who are dealing with weighted surfaces and in the near future, the results which are stated in this study can be handled in different four or higher dimensional spaces.

**REFERENCES**

- [1] Moore, C., "Surfaces of rotation in a space of four dimensions", *Ann. Math.*, 21(2): 81-93, (1919).
- [2] Moore, C., "Rotation surfaces of constant curvature in space of four dimensions", *Bull. Amer. Math. Soc.*, 26(10): 454-460, (1920).
- [3] Cheng Q.M. and Wan, Q.R., "Complete hypersurfaces of  $R^4$  with constant mean curvature", *Monatsh. Mth.*, 118(3-4): 171-204, (1994).
- [4] Yoon, D.W., "Rotation surfaces with finite type Gauss map in  $E^4$ ", *Indian J. Pure Appl. Math.*, 32(12): 1803-1808, (2001).
- [5] Arslan, K., Kılıç, B, Bulca, B. and Öztürk, G., "Generalized Rotation Surfaces in  $E^4$ ", *Results Math.*, 61(3-4): 315-327, (2012).
- [6] Arslan, K., Bayram, B., Bulca, B. and Öztürk, G., "On translation surfaces in 4-dimensional Euclidean space", *Acta et Com. Uni. Tar. De Math.*, 20(2):123-133, (2016).

- [7] Ganchev, G. and Milousheva, V., “General rotational surfaces in the 4-dimensional Minkowski space”, *Turkish J. Math.*, 38: 883-895, (2014).
- [8] Moruz, M. and Monteanu, M.I., “Minimal translation hypersurfaces in  $E^4$ ”, *J. Math. Anal. Appl.* 439(2): 798-812, (2016).
- [9] Dursun, U. and Turgay, N.C., “Minimal and pseudo-umbilical rotational surfaces in Euclidean space  $E^4$ ”, *Mediterr. J. Math.*, 10(1): 497-506, (2013).
- [10] Kahraman, F. and Yaylı, Y., “Boost invariant surface with pointwise 1-type Gauss map in Minkowski 4-space  $E_1^4$ ”, *Bull. Korean Math. Soc.*, 51: 1863-1874, (2014).
- [11] Kahraman, F. and Yaylı, Y., “General rotational surfaces with pointwise 1-type Gauss map in pseudo-Euclidean space  $E_2^4$ ”, *Indian J. Pure Appl. Math.*, 46: 107-118, (2014).
- [12] Güler, E., Magid, M. and Yaylı, Y., “Laplace-Beltrami operator of a helicoidal hypersurface in four space”, *J. Geom. and Sym. Phys.*, 41: 77-95, (2016).
- [13] Güler, E., Hacısalıhoğlu, H.H. and Kim, Y.H., “The Gauss map and the third Laplace-Beltrami operator of the rotational hypersurface in 4-space”, *Symmetry*, 10(398): 1-11, (2018).
- [14] M. Gromov, “Isoperimetry of waists and concentration of maps”, *Geom. Func. Anal.*, 13: 178-215, (2003).
- [15] I. Corwin, N. Hoffman, S. Hurder, V. Sesum and Y. Xu, “Differential geometry of manifolds with density”, *Rose-Hulman Und. Math. J.*, 7(1): 1-15, (2006).
- [16] L. Belarbi and M. Belkhelfa, “Surfaces in  $R^3$  with Density”, *i-manager.s Journal on Mathematics*, 1(1): 34-48, (2012).
- [17] D.T. Hieu and T.L. Nam, “The classification of constant weighted curvature curves in the plane with a log-linear density”, *Commun. Pure Appl. Anal.*, 13(4): 1641-1652, (2014).
- [18] M. Altın, A. Kazan and H.B. Karadağ, “Rotational surfaces Generated by Planar Curves in  $E^3$  with Density”, *International Journal of Analysis and Applications*, 17(3): 311-328, (2019).
- [19] A. Kazan and H.B. Karadağ, “Weighted Minimal And Weighted Flat Surfaces of Revolution in Galilean 3-Space with Density”, *Int. J. Anal. Appl.*, 16(3): 414-426, (2018).
- [20] F. Morgan, “Manifolds with Density”, *Not. Amer. Math. Soc.*, 52(8): 853-858, (2005).
- [21] F. Morgan, “Myers’ Theorem With Density”, *Kodai Math. J.*, 29: 455-461, (2006).
- [22] T.L. Nam, “Some results on curves in the plane with log-linear density”, *Asian-European J. of Math.*, 10(2): 1-8, (2017).
- [23] D.W. Yoon, D-S. Kim, Y.H. Kim and J.W. Lee, “Constructions of Helicoidal Surfaces in Euclidean Space with Density”, *Symmetry*, 173: 1-9, (2017).
- [24] D.W. Yoon and Z.K. Yüzbaşı, “Weighted Minimal Affine Translation Surfaces in Euclidean Space with Density”, *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*, 15(11), 2018.
- [25] Ö.G. Yıldız, S. Hızal and M. Akyiğit, “Type I+ Helicoidal Surfaces with Prescribed Weighted Mean or Gaussian Curvature in Minkowski Space with Density”, *An. S.t. Univ. Ovidius Constanta*, 26(3): 99-108, (2018).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Fotovoltaik güneş santrallerinde şebeke bağlantı sorunları ve çözümleri

## *Problems and solutions of grid-connected in photovoltaic solar plants*

Yazarlar (Authors): Nursal ARICI<sup>1</sup>, Aslı İSKENDER<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-9181-9377

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-4433-8084

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Arıcı N., İskender A., “Fotovoltaik güneş santrallerinde şebeke bağlantı sorunları ve çözümleri”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 215-222, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik. 644820



# Fotovoltaik Güneş Santrallerinde Şebeke Bağlantı Sorunları ve Çözümleri

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Nursal ARICI, Aslı İSKENDER\***

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Beşevler, Ankara

(Geliş/Received : 17.01.2019 ; Kabul/Accepted : 31.03.2019)

## ÖZ

Herhangi bir kaynaktan dağıtım sistemine bağlanan güç santralleri Dağıtık Enerji Santralleri olarak adlandırılır. Türkiye’de 1 MW’tan daha az güç üreten yenilenebilir kaynaklı santrallerin lisanssız üretim yapma hakkı bulunmamaktadır. Dolayısıyla bu santrallerden biri olan Fotovoltaik (FV) sistemlerin şebeke bağlantı sorunlarına karşı önceden önlem alınması adına gelişmiş ülkelerde standartlar geliştirilerek uygulamaya konulmuştur. Ülkemizde de belirli güçlerdeki lisanssız FV sistemlerin şebekeye bağlantıları için mevzuatta kolaylıklar sağlanmıştır. FV sistemlerin şebekenin enerji kalitesinde özellikle de gerilim açısından dalgalanmalar yarattığı da bir gerçektir. Bu tip şebeke bağlantı sorunlarını azaltarak güç kalitesini iyileştirmeye yönelik çalışmaların artması fotovoltaiklerin kullanımında önemli avantajlar sağlayacaktır. Bu çalışmada FV güneş santrallerinin şebekeye bağlantı sorunları irdelenmiş, önemli sorunların çözümlerine yönelik öneriler getirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş enerjisi, şebeke sorunları, FV.

## Problems and Solutions of Grid-Connected in Photovoltaic Solar Plants

### ABSTRACT

Power plants connected to the distribution system from any source are called Distributed Power Plants. The right to license the production of renewable-source generating less power than 1 MW power plants in Turkey is not available. Therefore, one of these plants, photovoltaic (PV) systems in order to take precaution against network connection problems in developed countries, standards were developed and put into practice. In our country, the legislation has been provided for the connection of unlicensed photovoltaic systems of certain powers to the grid. It is a fact that photovoltaic systems create fluctuations in the energy quality of the grid, especially in terms of voltage. Increasing efforts to improve power quality by reducing such grid connection problems will provide significant advantages in the use of photovoltaics. In this study, the connection problems of PV solar power plants to the grid have been examined and suggestions have been made to solve important problems.

**Key words:** Solar energy, grid problems, PV.

### 1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tüm Dünya’nın bildiği gibi enerji yaşamımızı doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Çevre kirliliği, küresel ısınma, ozon tabakasının incilmesi, insan sağlığına olumsuz etkisi gibi sorunların yanı sıra fosil yakıtların giderek azalması ile yenilenebilir enerji üretimi son yıllarda oldukça önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretiminin ilk yatırım maliyetleri giderek azalmakta ve temiz enerji kaynakları olarak değerlendirilmektedir.

Türkiye’nin yıllık ortalama güneş ışınımı miktarı 1303 kWh/m<sup>2</sup>yıl olup ortalama güneşlenme süresi 2623 saattir. Dolayısıyla günlük 3.6 kWh/m<sup>2</sup> lik bir güç eldesi mümkün kılınmaktadır. Türkiye’nin güneş enerjisinden 26.2 milyon TEP (ton eşdeğer petrol) yararlanma potansiyeline sahiptir. Bu potansiyelin değerlendirilmesinde FV sektörünün, Türkiye’de yakın gelecekte kayda değer bir gelişme göstermesi

beklenmektedir. 2018 sonu itibarıyla Türkiye’nin Elektrik Kurulu Gücü, 88452 MW’a ulaşmıştır. 2018 yılı kaynak bazında dağılımda güneş enerjisinin kurulu gücü 5062.83 MW’a ulaşarak, kurulu güç içerisindeki payı %5.7’ye ulaşmıştır [1].

FV sistemlerin yaygın olarak kullanımı, sistemlerin şebekeye bağlantısında oluşabilecek sorunların giderilmesiyle güç kalitesinin artırılmasına bağlıdır. Bu çalışma ile FV sistemlerin şebekeye bağlantılarında oluşabilecek sorunlar ve bunların çözümleri üzerine öneriler sunulmuştur.

### 2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE REVIEW)

FV sistemlerde en önemli parametrelerden biri verimliliğidir. Bu durumda bir FV sistemin tüm elemanlarının mühendislik açısından incelenmesi, fotovoltaik modüllerin konumlandırılması oldukça önemlidir. En yaygın olarak kullanılan kristal silisyum teknolojisinin verimliliği %15’in üzerinde olup diğer

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : aslipeyk@gmail.com

teknolojilere göre daha az maliyetlidir. FV sistemler için kalite ve güvenilirlik açısından yapılan çalışmaların yanı sıra yatırımcılar için maliyeti ve sistemde oluşabilecek riskleri en aza indirme amaçlı incelemeler yapılmaktadır. FV güç sistemleri belirli uluslararası standartla uygun olarak ve tasarımı etkileyen iklim koşullarına göre tasarlanırlar.

Bu FV sistemleri etkileyen etmenler şunlardır: Güneş ışınım miktarı, nem, rüzgar ve kar, sıcaklık değişimleri, toz vb. kirlerdir.

FV güç sistemlerinin izlenmesi ve performans analizine yönelik literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Fotovoltaik Güç Sistemleri (FVGS) uygulamalarının izlenmesi ve performansı analizi ile ilgili örnek bazı literatür çalışmaları ve sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

- Masoud Farhoodnea ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [2], şebekeye bağlı 3 kW<sub>p</sub> (kilo watt peak) kurulu gücünde olan bir FVGS'yi altı ay boyunca (Ekim 2013 ve Mart 2014 aralığında), Malezya'da Kebangsaan Üniversitesi'nin kampüsünde, 1 dakikalık aralıklarla izlenmiş ve yapılan modelleme ile karşılaştırılmasını yapmışlardır. Deneysel çalışmanın sorucuna göre FV modülün verimi % 10,11, eviricinin verimi % 95,15, sistemin aylık ortalama performans oranı % 77,28 ve kapasite faktörü %15,7 olarak gözlemlenmiştir.
- Gölge etkeni, FVGS'de ciddi kayıplara sebep olmaktadır. FV sisteminin tasarımı yaparken, gölge konusu öncelikli dikkate alınmalıdır. Sistem dizilerinin arasındaki mesafeler, en uygun uzaklıkta konumlandırılmalıdır. Ayrıca, sistemin dışında ortaya çıkan her türlü gölge etkisinden uzak durulmalıdır. Bu doğrultuda yapılan araştırmalara, S. Malathy ve R. Ramaprabha [3] tarafından yapılan çalışmayı örnek verebiliriz. FV dizinin gücü, FV dizisinin bağlantısı ve FV modüllerin konumu optimum şekilde tasarlanıp ve uygulanırsa, gölgeleme nedeni ile ortaya çıkan kayıplar en aza indirilmektedir.
- Radzimeska [4] çalışmasında, FVGS performansı üzerinde tozun etkisine odaklanmıştır. Polonya'da yapılan performans incelemesinde, Kristal silisyum yapıları FV modülleri gözlenmiştir. Bu çalışmaya göre, FV modülün eğimi, rüzgar hızı, tozun özellikleri ve çevre koşulları gibi etkenler, modüller üzerinde biriken toz miktarını etkilemektedir. FVGS performansında azalma, modül üzerinde biriken toz miktarı ile lineer olarak değişmektedir. Günlük enerji veriminde ortaya çıkan kayıp, kristal silisyum yapıları modüllerde 37° eğim açısında % 0,8 olarak gözlemlenmiştir. Bu araştırmaya göre, bütün modüllerde toz nedeniyle ortaya çıkan güç kaybı, senelik % 3 olarak raporlanmıştır [4].

### 3. FOTOVOLTAİKLER (PHOTOVOLTAICS)

FV hücrenin basitleştirilmiş eşdeğer devresi Şekil 1'de gösterildiği gibidir. Şekil 1'deki eşdeğer devrenin akım gerilim (I-V) denklemi, Kirchhoff'un akım kanununa

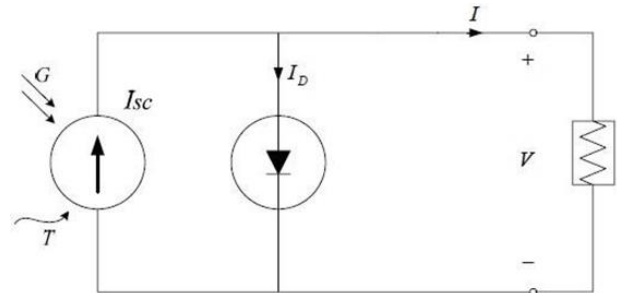
göre:

$$\begin{aligned} I_{SC} &= I - I_D \\ &= I \\ &- I_0 \left( \exp^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (1)$$

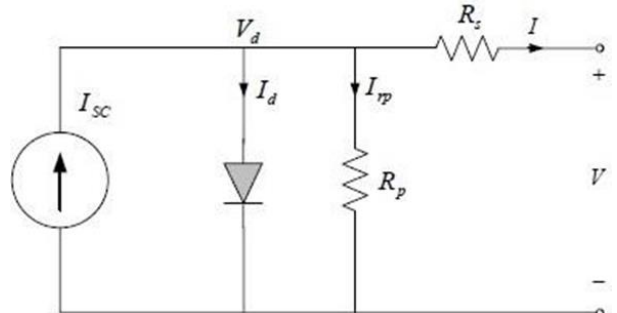
25 °C için I

$$\begin{aligned} &= I_{SC} \\ &- I_0 (e^{38.9V} - 1) \end{aligned} \quad (2)$$

verilir. Saha uygulamalarında harici kontaklar üzerinde gerilim düşümü gözlemlendiğinden buradaki gerilim kaybı, seri bir R<sub>s</sub> direnci ile ifade edildiğinde, kayıpları da dikkate alan eşdeğer devre Şekil 2'deki gibi gösterilebilir [4].



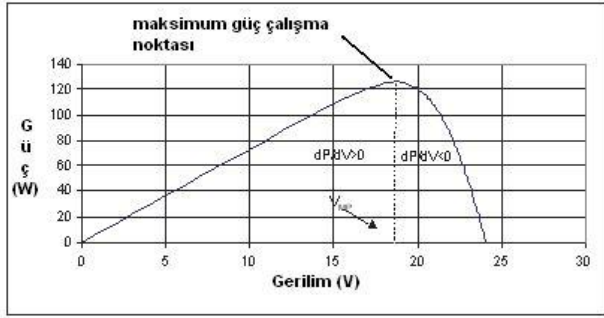
Şekil 1. FV sistemin eşdeğer devresi (Equivalent circuit of PV system) [1]



Şekil 2. FV sistemin elektriksel eşdeğer devresi (Electrically equivalent circuit of PV system) [1]

FV modüller hücrelerin seri ve paralel olarak istenilen gerilim ve güç seviyesi sağlanması prensibine göre oluşturulur. FV sistemi şebekeye bağlanması için bağlantıdan önce evirici kullanılır ve eviricinin görevi gerilim ve frekans kontrolü ile koruma ve ada konuma geçme kontrollerini yapmaktır [5].

FV sistemlerin kontrolleri maksimum çıkış gücünün izlenmesi metoduna göre yapılır. Bu prensibe göre hazırlanan kontrol algoritması FV modülün sürekli olarak güç-gerilim eğrisi üzerindeki (Şekil 3) maksimum güç noktasına yakın değerlerde sistemi tutmaya çalışır [6].



**Şekil 3.** Fotovoltaiklerin çıkış gücü-gerilim karakteristikleri (Output power-voltage characteristics of photovoltaics) [6]

FV güneş sistemlerinin verimi, elde edilen çıkış gücünün modül yüzeyine düşen toplam güneş ışınımına oranı şeklinde hesaplanır [5]: verim “ $\eta$ ” işareti ile gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \eta_{\text{maks}} &= \frac{P_{\text{maks}}}{P_{\text{ışınım}}} \\ &= \frac{I_{\text{maks}} V_{\text{maks}}}{AR_A} \end{aligned} \quad (3)$$

Sistemin verimi bir çok parametreye bağlı olmakla beraber malzemesine ve üretim yöntemine göre değişmektedir. Enerjinin büyük bir kısmı modül yüzeyinde ısı olarak elde edilmekte ancak bu ısı modüllerin verimini düşürmektedir [6].

### 3.1.Şebekeye Bağlı Sistemler (On-Grid Systems)

Güneş enerjisi santrallerinin diğer bir tipi de domestik elektrik enerjisi dağıtım şebekesine bağlı olan sistemlerdir. Uygulamalarda birçok farklı detaylar olmasına rağmen ortak özellikleri, şehir şebekesine bağlanabilen ve gerektiği durumlarda şebekeye elektrik enerjisi iletimine olanak verebilen bu sistem tipleri günümüzde oldukça yaygındır.

Bu tür sistemler temel olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Birinci sistem, kurulan Güneş panelleriyle tamamen elektrik enerjisi üreterek şebekeye destek sağlama ya da elektrik enerjisi satma amacıyla kurulan tiplerdir. Bu sistemler üretilen enerjinin büyük yükleri beslemek için değil, doğrudan şebekeye iletilmesi ve satışı nedeniyle çeşitli ölçeklerde kurulabilir. Ayrıca üretilen enerjiyi uzak noktalara taşımadan en yakında bulunan dağıtım şebeke sistemine bağlanarak iletim/dağıtım kayıplarının en az oranda tutabilmektedir[7].

İkinci sistemler ise, kullanıcının hem elektrik ihtiyacını karşılayarak kullanımın düşük olduğu durumlarda ya da paneller ile üretilen enerji üretiminin yüksek olduğu zamanlarda şebekeye satılmasına böylelikle kullanıcının gelir elde etmesine dayanmaktadır [8].

Şebekeye bağlantılı FV sistemlerin bir başka avantajı, bakım maliyetinin önemli ölçüde düşük olmasıdır ve uzun süre bakıma ihtiyacı olmadan çalışmaya devam edebilmeleridir. Bu sistemlerin elektriğin tüketildiği yere

yakın olarak üretilmesi, enerji iletim kayıplarını azaltmaktadır [4].

Şebeke bağlantılı FV sistemler şebeke yükünü hafifleterek gerekli şebeke yatırımlarını geciktirmekte ve hatta yatırımlara olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır [9].

Bu tip sistemlerde, oluşabilecek problemlerin önüne geçme amacıyla, FV sistem çıkış gerilim karakteristiği, şebekenin gerilimine oldukça yakın olmak zorundadır. Bilindiği üzere, elektrik iletim ve dağıtım şirketlerinin uyması gereken en önemli kurallardan bazıları şebeke gerilim seviyesi ve frekans değeridir. Bu nedenle elektrik şebekesine bağlanması düşünülen bir sistemin hem kendi güvenliği hem de elektrik şebeke güvenliği ve kalitesi için senkronizasyon oldukça önemlidir. Temel olarak şebekeye enterkonnekte olacak bir sistemde aranması gereken dört ana madde sıralanabilir [8]:

- FV sistem çıkış gerilim frekansı şebeke frekansı ile senkronize olmalıdır.
- FV sistem çıkış terminal gerilim büyüklüğü şebeke gerilim seviyesi ile aynı olmalıdır.
- Şebeke üç faz sırası, FV sistem çıkış fazlarının sırasıyla aynı olmalıdır.
- Faz açısı şebeke ve FV sistem arasında senkronize olmalıdır.

Aynı zamanda FV sistemde oluşabilecek bir problemde, şebeke bağlantısının çeşitli kontrol sistemleriyle kesilerek, elektrik şebekesine yansımalarının önüne geçilmelidir. Şebeke frekans dalgalanmaları ve gerilim yükselmelerinde aynı şekilde FV sistemi korumak için devre dışı hale gelmelidir [10].

FV sistemler şebekeye doğru akım vermemeli ve şebekeye bağlantısında kullanılan eviricilerin filtre devreleri içermesi gerekir. Gerilim sınırları için uluslararası standart olan EN50160 geçerli olup, alçak gerilimde nominal gerilimin  $\pm\%10$ 'una kadar bir değişime izin verilmektedir. Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmeliğe göre, can ve mal emniyetinin sağlanması için şebekeye paralel çalışan yerel üretim sistemlerinin şebeke kaybı veya kısa devre arızasının oluşması durumuna göre şebeke bağlantısının kesilmesini zorunlu kılar. Enerji depolama sistemleri olsa dahi bu bağlantı türünde yerel yükler beslenemez ve kritik yük durumunda da maddi kayıplar oluşabilmektedir. Bu sorunlar ebeke bağlantısının eviriciler yerine ayrı bir bağlantı sistemi üzerinden yapılması gerekir [11].

## 4. ŞEBEKE BAĞLANTILI FV SİSTEMLERİN ŞEBEKE BAĞLANTI SORUNLARI (MAIN CONNECTION PROBLEMS OF NETWORK CONNECTED PV SYSTEMS)

Geleneksel dağıtım sistemlerinde güç kalitesini etkileyen en önemli etken yük tarafı olurken, dağıtık enerji santrallerinin olduğu bir şebeke sisteminde ise üretim tarafı da belirleyici bir etken haline gelmiştir (Çizelge 1). Dolayısıyla dağıtım sisteminin güç kalitesi problemini

hem yükler hem de santraller açısından ayrı ayrı ele alınması gerekir.

analizi yapılırken sistemin dayanabileceği sınır değerlerinde analiz yapılması bu açıdan önemlidir [15].

**Çizelge 1.** Dağıtım sisteminin etkileri (Effects of distribution system)

Dağıtım Sistemi	Tüketim tesisi	Dağıtık Enerji Santrali	Güç Kalitesi
Geleneksel	Var	Yok	Tüketim
Modern	Var	Var	Tüketim ve Üretim

#### 4.1. Ada mod çalışma (Island mode work)

Ada mod çalışmanın anlamı, bir dağıtım sistemindeki güç sisteminin kalan kısmından elektrik olarak izole edilmesi durumunda, enerji akışının dağıtık üretim (DG) sistemi tarafından devam ettirilmesi durumudur. Ada mod çalışmada, şebeke bağlantılı FV sistem, şebeke ile bağlantısı kesildiği halde yükü beslemeye devam eder [12]. Ada mod çalışma güvenlik problemlerini de beraberinde getirir. Gerilim ve frekans değerleri izin verilen standartların dışına çıktığından PV sistem ve şebeke zarar görebilir [13]. IEEE 929-2008 standartlarına [14] göre şebeke bağlantılı bir PV sistem, ada mod çalışmaya geçtiğinde en kısa sürede şebekeden ayrılmalıdır (Çizelge 2). IEEE 1547-2015 standardına göre bu süre en fazla 2 saniye olarak belirtilmiştir [15].

**Çizelge 3.** Gerilim dalgalanması için sınır değerleri (Limit values for voltage fluctuation) [17]

PV Sistem Çalışma Durumu	Maksimum Değer
Şebeke Bağlantılı PV Sistem Devreye Girerken	$\pm \%3,3 V$
Şebeke Bağlantılı PV Sistem Devreden Çıkarken	$\pm \%3,3 V$
Devrede olduğu sürede (%95)	$\pm \%10$

#### 4.3. Uzun ve Kısa Süreli Gerilim Bozulmaları (Long and Short Term Voltage Distortions)

Bir dakikadan daha uzun süre boyunca meydana gelen nominal gerilimin etkin değerindeki değişimler uzun süreli gerilim bozulmaları olarak adlandırılır. Gerilim

**Çizelge 2.** IEEE 929-2008 tarafından belirlenen şebeke bağlantı esasları (Network connection principles set by IEEE 929-2008) [14]

No	Frekans	Gerilim	Kesici Açma Süresi
1	$f_{nom}$	$0,5V_{nom}$	6 periyot
2	$f_{nom}$	$0,5V_{nom} < V < 0,88V_{nom}$	2 sn / 120 periyot
3	$f_{nom}$	$0,88V_{nom} \leq V \leq 1,10V_{nom}$	Normal Çalışma
4	$f_{nom}$	$1,10V_{nom} < V < 1,37V_{nom}$	2 sn / 120 periyot
5	$f_{nom}$	$1,37V_{nom} \leq V$	2 periyot
6	$(f_{nom}-0,7) \leq f \leq (f_{nom}+0,5)$	$V_{nom}$	Normal Çalışma
7	$f < (f_{nom}-0,7) Hz$	$V_{nom}$	6 periyot
8	$f > (f_{nom}+0,5) Hz$	$V_{nom}$	6 periyot

#### 4.2. Gerilim dalgalanması

PV sanraller devreye girip çıkarken, gerilim düşümü veya yükselmesine neden olabilir. Bu değerler ise IEC 61000-3-3 standartlarına göre şebeke bağlantılı sistem devreye girerken ve çıkarken nominal gerilimin  $\pm \%3,3$ 'ünü aşmayacak şekilde sınırlandırılmıştır (Çizelge 3) [16]. Ayrıca güç sisteminin devrede olduğu sürenin  $\%95$ 'inde standartlar gereği nominal gerilim değerinin  $\pm \%10$ 'unu aşmamalıdır. Özellikle gerilim

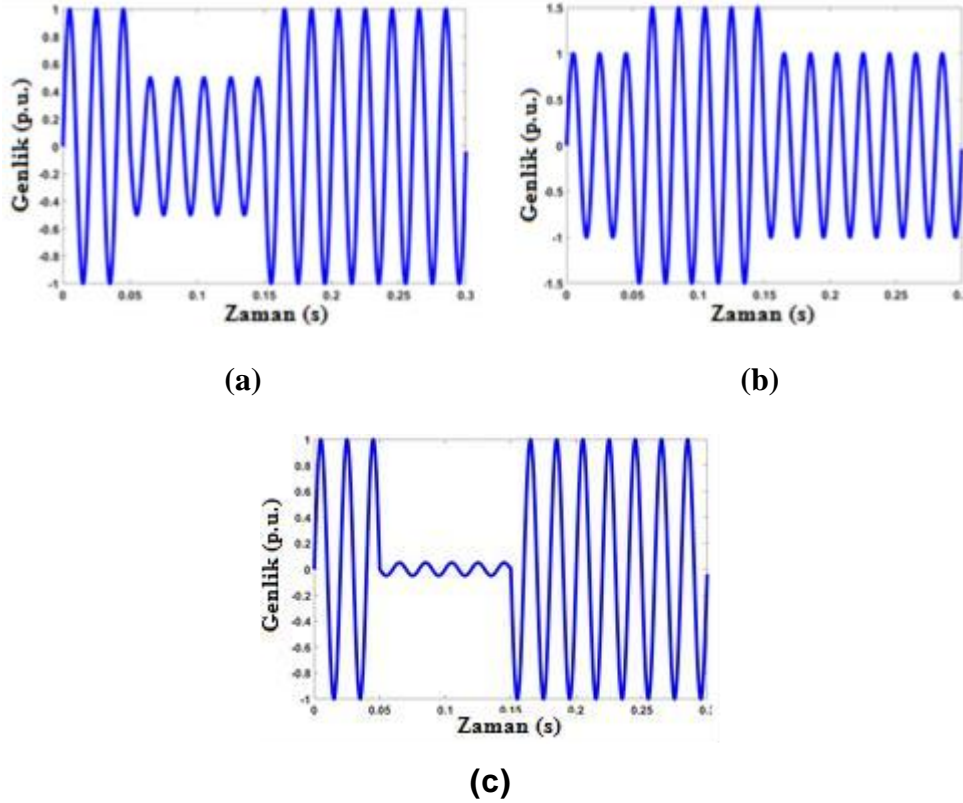
genlik değerine bağlı olarak bu değişim sistemdeki kalıcı arızalar, yük değişimi ve anahtarlama işlemleri ile ilişkili olabilir.

Gerilim değişiminin büyüklüğüne bağlı olarak, uzun süreli gerilim değişimleri düşük gerilim, aşırı gerilim ve sürekli kesinti durumları olarak sınıflandırılabilir. Şebeke nominal geriliminin etkin değerinde meydana gelen kısa süreli değişimler kısa süreli gerilim bozulmaları olarak adlandırılır.

Aşırı güç çeken motorlar, aşırı yüklenme ve hat boyunca meydana gelen arızalar gerilim çökmesine neden

#### 4.5.Harmonikler (Harmonics)

Güç sisteminde meydana gelen harmoniklerin başlıca



Şekil 6. (a) Gerilim çökmesi, (b) gerilim sıçraması ve (c) gerilim kesintisi ((a) Voltage failure, (b) voltage jump and (c) voltage failure)[15]

olmaktadır. Gerilim çökmesi olayı, şebeke frekansında çalışan bir güç sisteminde 10ms-60s zaman aralığında sınırlı olmak kaydıyla, gerilimdeki %10-90 arasında meydana gelen azalma olarak tanımlanır.

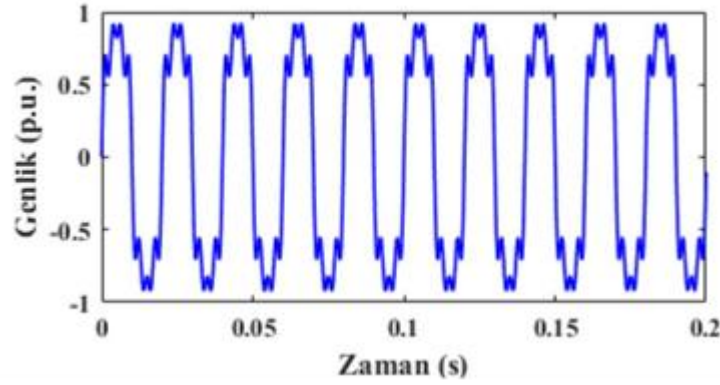
Gerilim sıçraması olayı, şebeke frekansında çalışan bir sistemde 10ms-60s zaman aralığında sınırlı olmak kaydıyla, gerilimdeki %110-%180 arasında meydana gelen artış olarak tanımlanır. Büyük endüktif yüklerin devreden alınması veya büyük kapasitör banklarının devreye alınması gibi güç sistemindeki manevralar ile simetrik olmayan arızaların, arızasız fazlarında gerilim sıçramaları oluşur. Konumuna ve güç sistemi koşullarına bağlı olarak bir arıza veya güç kalitesi problemi, gerilim çökmesine, gerilim sıçramasına veya gerilim kesintisine neden olabilir. Şekil 6'da arıza sonrasında oluşan gerilim şekilleri gösterilmiştir [15].

#### 4.4.Gerilim dengesizliği

Alçak gerilim şebekesi için sadece gerilimin negatif bileşeni dikkate alınarak oluşturulan EN 50160 standartlarına göre ölçüm süresinin %95'inde gerilim dengesizliği %2'yi geçmemelidir. Gerilim dengesizliğinin önlenmesi amacıyla her bir faza miktarda FV santral bağlanarak, güç fazlara mümkün olduğunca eşit olarak dağıtılmalıdır.

kaynakları, yarı iletken kontrollü güç kaynakları, inverterler, frekans dönüştürücüler, kaynak makineleri, ark ocakları ve doğrusal olmayan yüklerdir. Güç sisteminde kullanılan cihazların neredeyse tamamı doğrusal olmayan yüklerden oluşur ve bu da güç kalitesi sorunlarını beraberinde getirir. Harmoniklerin sebep olduğu başlıca problemler ise kontrol sistemlerinde, bilgisayarlarda, endüstriyel elektronik cihazlarda meydana gelen arızalar, transformatörlerdeki ve motorlardaki aşırı ısınma ile dağıtım sisteminde meydana gelen gerilim /akım dalga şekli bozulmaları ve rezonans olaylarıdır. Şekil 7, yüksek derecede harmonik içeren böyle bir gerilim sinyalinin göstermektedir.

Güç sistemlerinde akım harmonikleri dağıtım şebekesindeki tüketiciler tarafından incelenirken, şebeke tarafında ise daha çok gerilim harmonikleri üzerinde durulur. Elektrik üretim santrallerinde üretilen ve iletim hatlarına taşınan gerilimin harmonik bozulma miktarı çok düşük seviyededir. Ancak dağıtım şebekesindeki tüketici noktalarına yaklaşıldığında doğrusal olmayan yüklerin çektiği güce bağlı olarak gerilim ve akım dalga formu sinüs işaretinden oldukça uzaklaşabilmektedir. Bu da harmonik bozulmanın ana kaynağının tüketici olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. Yüksek derecede harmonik içeren gerilim sinyali (High-harmonic voltage signal) [15]

Gerilim ve akım dalga formundaki temel harmonik dışındaki harmoniklerin toplam etkin değerinin, temel harmoniğin etkin değerine oranı toplam harmonik bozulma (THB) olarak tanımlanır.

$$THB = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{V_n^2}{V_1^2}} \quad (4)$$

Eşitlik 4’de  $V_n$ , n’inci harmonik bileşenin genliğini ifade ederken  $V_1$  değeri ise temel gerilim genliğini ifade etmektedir.

IEEE 519 standartlarına [18] bağlı olarak izin verilen toplam harmonik bozulma miktarı, güç sisteminin gerilim seviyesine bağlı olarak değişmektedir. Alçak gerilim şebekelerinde THB %8’den, her bir harmonik değer ise %5’ten küçük olacak şekilde sınırlandırılmıştır [15].

Bir güç sisteminde yüksek harmoniklerin genliği ne kadar büyükse sistemdeki nominal dalga şekli o kadar bozulmuştur. IEC 61000-3-2 standartlarına göre olması gereken akım harmonik sınır değerleri Çizelge 4’te verilmiştir [19]. Bu değerler, alçak gerilim seviyesinden şebekeye bağlanan FV sistemler için geçerlidir.

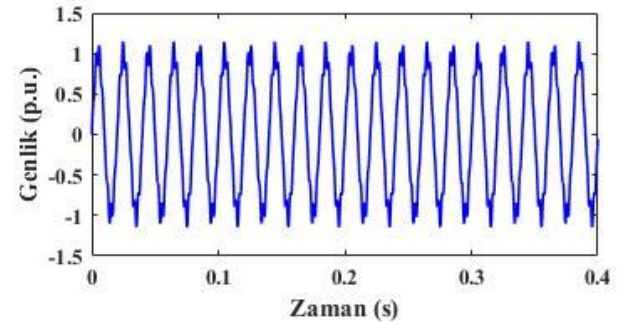
Çizelge 4. Akım için harmonik sınır değerleri (Harmonic limit values for current) [19]

Harmonik	2	3	5	7	9	11	13	$15 \leq n \leq 39$
Sınır	1.08	2.3	1.14	0.77	0.4	0.33	0.21	0.15

#### 4.6.Kırpışma (Flicker)

Gerilim dalgalanması sonucunda oluşan kırpışma dağıtım şebekesinden bağımsız, tüketici yüklerden kaynaklanan bir güç kalitesi olayıdır. Güç kalitesi olayları arasında en sık karşılaşılan problemlerden biri olan kırpışma, güç sistemi nominal frekans ve gerilimde çalışırken, gerilimin çeşitli nedenlerden dolayı daha düşük bir frekansta ve genlikte salınmasının sonucunda oluşur. Kırpışma, bir lambada parlaklığın dalgalanmasına, manyetik çekirdeğe sahip cihazlarda arızalara ve elektrik motorlarında hız değişimlerine

neden olur. Kırpışmanın büyüklüğü, gerilimdeki değişime ve bu değişimin frekansına bağlıdır. Kırpışma içeren bir gerilim sinyali Şekil 8’de verilmiştir. Kırpışma sınır değerleri IEEE Std. 1453-2004 ve IEC 61000-2-2 standartlarına uygun olmalıdır [20]. Ayrıca bu standartlarda, kırpışma olayının hesabı için çeşitli parametreler tanımlanmıştır.



Şekil 8. Kırpışma içeren bir gerilim dalga şekli (A voltage waveform that contains clipping)

Standartlarla sınırları çizilen kırpışma olayı kısa dönem ve uzun dönem olmak üzere iki başlık altında incelenir. Uzun dönem kırpışma için hesaplanan PLT değeri ise 2 saat boyunca onar dakika aralıklarla yapılan ölçümler sonucu elde edilen PST değerlerinden hesaplanır [15].

$$P_{LT} = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{n=1}^{\infty} P_{ST}^3} \quad (5)$$

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumuna ait Elektrik Şebekesi Yönetmeliği’nde [19] 1 saat içinde 10 seferden fazla gerçekleşen hızlı gerilim değişimleri kırpışma olarak değerlendirilmiştir. IEC 61000-2-2 ve IEC 6100-3-3 standartlarına göre uzun dönem ve kısa dönem kırpışma sınır değerleri Çizelge 5’te verilmiştir.

**Çizelge 5.** Kırpışma sınır değerleri (Clipping boundary values) [19]

EC 61000	PV Santral (IEC 100-3-3)	Tüketici (IEC 6100-2-2)
P <sub>ST</sub> (Kısa Dönem)	≤ 1.00	≤1.00
P <sub>LT</sub> (Uzun Dönem)	≤ 0.65	≤ 0.80

#### 4.7.Çentik (Notch)

Çentik, şebeke frekansında çalışan bir sistemde, gerilimin bir periyodunda dönüştürücünün (konvertör) darbe sayısı kadar meydana gelen ve tekrar eden yarım periyottan kısa süreli gerilim dalga şekli bozulmasıdır. Çentik etkisi ile oluşan frekans bileşenleri çok yüksek olduğundan klasik harmonik ölçüm cihazları ile tanımlanamazlar. IEEE 519-2015 [18] standardına göre çeşitli uygulama alanları ile farklı türde sistemler için çentik alan ve derinliğine bağlı sınır değerler Çizelge 6'daki gibidir.

**Çizelge 6.** Gerilimde meydana gelen çentik sınır değerleri (Notch limit values in voltage)[18]

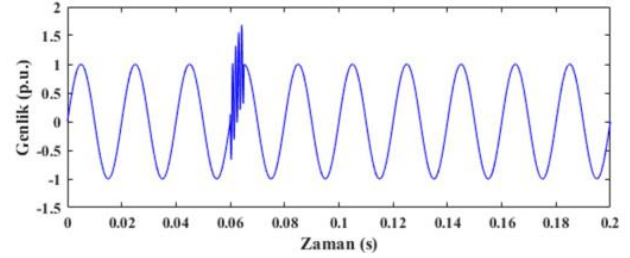
	Özel Uygulamalar (Hastane, Hava Limanı vb.)	Genel Sistem	Dönüştürücü Bulunduran Sistemler
Çentik Derinliği	10%	20%	50%
Çentik Alanı (An)	16400	22800	36500

**Çizelge 7.** Frekans ortalama değer sınırları (Frequency average value limits) [15]

TS EN 50160	Yüzde sınırı	Değer Aralığı	Çalışma Süresi
Frekans	50 Hz ± %1	49,5 Hz-50,5 Hz	99,50%
	50 Hz +%4/ -%6	47 Hz-52 Hz	100%

#### 4.8.Geçici durum olayları (Transients)

Geçici olaylar yüksek frekans bileşenleri içermekle beraber yarım periyottan daha kısa süren olaylardır. Bu olay sonucunda oluşan bozulmanın, genlik değeri nominal gerilimin 8 katına kadar çıkabilir. Güç sistemlerinde anlık olarak oluşan geçici durumlar, salınımlı ve darbeleri olmak üzere iki grupta incelenir. Darbe sonucunda oluşan geçici durum olayları, genellikle yıldırımından kaynaklı olup ani ve tek yönlüdür. Salınımlı geçici olaylar ise negatif ve pozitif olmak üzere çift yönlü özellik göstermekle beraber yarım periyot kadar sürebilirler. Salınımlı geçici olaylar kapasitör banklarının devreye alınması, büyük yüklerin devreden çıkarılması, hat veya transformator enerjilendirilmesi sonucunda oluşmaktadır. Salınımlı geçici durum olayı içeren gerilim dalga formu Şekil 9'da verilmiştir.

**Şekil 9.** Geçici durum olayı içeren gerilim dalga şekli (Voltage waveform with transient event) [15]

#### 4.9.Frekans değişimi (Frequency change)

Frekans değişimi, güç sistemindeki frekans değerinin nominal değerinden sapsmasıdır. Güç sistemdeki yük miktarı ile üretilen güç miktarının uyuşmaması frekans değişimine yol açar. Frekans değişiminin boyutu ve süresi ise yük kontrol sisteminin cevabına bağlıdır. TS EN 50160 standartlarına göre normal çalışma şartları altında şebeke bağlantılı bir FV sistemde ve şebekede yıl içindeki çalışma sürelerine göre sınır aralıkları Çizelge 7'de verilmiştir.

#### 4.10.Doğru akım enjeksiyonu (Direct current injection)

AG şebekesine bağlı FV üretim santralindeki inverterler sisteme DC akım verebilirler. DC akım enjeksiyonu dağıtım transformatorünü doyuma götürerek dalga şeklinin nominal koşulların dışına çıkmasına neden olur. IEEE Std 929-2000 standartlarına göre inverterler üzerinden sisteme verilen bu DC akım, nominal akımın %0,5'i ile sınırlandırılmıştır [15].

#### 4.11.Gürültü (Noises)

Gürültü, bir güç sisteminde nominal akım ve gerilim dalgası üzerine binen ve istenmeyen elektriksel işaretlerdir. Gürültü olayı, güç elektroniği cihazlarından, anahtarlamalı güç kaynağı içeren yüklerden veya yüksek ark cihazlarından kaynaklanabilir. Özellikle mikroşlemci ve PLC gibi hassas cihazlara zarar verir.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Şebekedeki güç kalitesinin bozulmaması uluslar arası standartlara uygun, panel, evirici, kablo ve koruma elemanlarının kullanılmasını kaçınılmaz kılmaktadır.

Lisanssız Güneş enerji santrallerinin güvenlik açısından risk oluşturmaması için mutlaka ters besleme sisteminin ortadan kaldırılması gerekir. Dolayısıyla çift yönlü güç akışı, AG seviyesinde dijital koruma rölesi kullanımının sağlanması ile bu durum sağlanabilir. Farklı güçlerdeki ve özelliklerdeki Güneş enerji santrallerinin olduğu sistemlerde, gerilim dalgalanması, kırıpışma, DC akım enjeksiyonu, toplam akım bozulması ve faz dengesizliğine izin verilmemelidir.

Güneş enerji santrallerinin güç kalitesine olumsuz etkilerini engellemek için eviricilerin kullanımı anahtar rol oynamaktadır.

Bu çalışmada FV güneş santrallerinin şebeke bağlantılarında oluşan sorunlar ile çözüm yöntemleri detaylı bir şekilde irdelenmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] GÜNDER, 2019, <https://www.solar.ist/2018-yilinda-turkiyenin-gunes-enerjisi-kurulu-gucu-5-063-mwye-ulasti/>
- [2] Farhoodnea, M., Mohamed, A., Shareef, H., Zayandehroodi, H., Power quality analysis of grid-connected photovoltaic systems in distribution networks, *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 208-213, 2013
- [3] Malathy, S., Ramaprabha, R., Reconfiguration strategies to extract maximum power from photovoltaic array under partially shaded conditions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(2): 2922-2934, 2018.
- [4] Jalilisaatlou, R. “Fotovoltaik güç sistemlerinin kalite karakteristiklerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, (2015)
- [5] Akdeniz, E., “Yenilenebilir Kaynaklardan Enerji Üretiminin Şebekenin Enerji Kalitesi ve Kararlılığına Etkilerinin İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2006)
- [6] Tan, Y.T., “Impact on the Power System with a Large Penetration of Photovoltaic Generation”, *PhD Thesis*, University of Manchester, February, (2004)
- [7] Bellia, H., Youcef, R., Mouley, F., “A detailed modelling of photovoltaic module using MATLAB”, *National Research Institute of Astronomy and Geophysics Journal*, 53-61, (2014)
- [8] Doğan, S., “Şebeke Etkileşimli Fotovoltaik Güç Sistemlerinin İncelenmesi ve Simülasyonu”, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, (2018)
- [9] Çubukçu, M., “Türkiye’nin Farklı Konumlarında Farklı Topolojilerde Fotovoltaik-Rüzgar-Yakıt Pili Hibrid Güç Sistemlerinin Modellenmesi Karşılaştırmalı Simülasyonu ve Uygulamalı Performans Analizi”, *Doktora Tezi*, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir, (2011)
- [10] Peren, V., “Fotovoltaik Su Pompalama Sistemi Tasarımı ve Modellenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, (2016)
- [11] Kandemir, Ç., Bayrak, M., Fotovoltaik Sistemler Şebekeye Bağlı Olduğunda Oluşan Sorunlar, Elektrik Mühendisleri Odası
- [12] Bayrak, G., “A remote islanding detection and control strategy for photovoltaic-based distributed generation systems”, *Energy Conversion and Management* 96: 228-241, (2015)
- [13] Bayrak G., Cebeci M., “Şebeke Bağlantılı PV Güç Sistemlerinde Ada Modlu Çalışma ADMÇ ve Tespit Yöntemleri”, *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı*, Türkiye, 26-28, (2013)
- [14] IEA International Energy Agency, “Evaluation of Islanding Detection Methods for Photovoltaic Utility Interactive Power Systems, in Task V Report”, (2002)
- [15] Yılmaz, A., “Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik (PV) Sistemlerin Mevcut Elektrik Şebekesi İle Entegrasyonu Ve Güç Sistemine Etkileri”, *Yüksek Lisans Tezi*, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, (2018)
- [16] [http://www.emo.org.tr/ekler/0f027d0cc62ecbd\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/0f027d0cc62ecbd_ek.pdf)
- [17] “Electromagnetic Compatibility (EMC), Limits – Limitation Of Voltage Changes, Voltage Fluctuations And Flicker In Public Low-Voltage Supply Systems, For Equipment With Rated Current ≤ 16 A Per Phase And Not Subject To Conditional Connection”, IEC 61000-3-3, (2002)
- [18] IEEE Std 519, “IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems”, (2014)
- [19] EPDK, “Elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretimine ilişkin yönetmeliğin uygulanmasına dair tebliğ”, *T.C. Resmi Gazete*, 28783, (2013)
- [20] Hernández, J. C., Ortega, M. J., De la Cruz, J., and Vera, D., “Guidelines for the technical assessment of harmonic, flicker and unbalance emission limits for PV-distributed generation”, *Electric Power Systems Research*, 81(7): 1247-1257, (2011)





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Cogging torque minimization using skewed and separated magnet geometries

## Çarpık ve parçalı mıknatıs geometrileri kullanarak vuruntu torku minimizasyonu

Yazar(lar) (Author(s)): Adem DALCALI<sup>1</sup>, EROL KURT<sup>2</sup>, Emre ÇELİK<sup>3</sup>, Nihat ÖZTÜRK<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-9940-0471

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-3615-6926

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-2961-0035

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0002-0607-1868

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Dalcalı A., Kurt E., Çelik E. and Öztürk N., “Cogging torque minimization using skewed and separated magnet geometries”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 223-230, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.552273

# Çarpık ve Parçalı Mıknatıs Geometrileri Kullanarak Vuruntu Torku Minimizasyonu

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Adem DALCALI<sup>1\*</sup>, Erol KURT<sup>2</sup>, Emre ÇELİK<sup>3</sup>, Nihat ÖZTÜRK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Bandırma, Balıkesir, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Düzce, Türkiye

(Geliş/Received : 11.04.2019 ; Kabul/Accepted : 08.08.2019)

## ÖZ

Çalışmada, 2,5 kW gücünde 14 kutuplu, 84 oluklu sabit mıknatıslı senkron generatörün (SMSG) analitik tasarımı, analizi ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu tasarıma ait verim, tork, vuruntu torku ve manyetik akı yoğunluğu gibi performans özellikleri değerlendirilmiştir. Ardından mıknatıs geometrisinin vuruntu torkuna etkisini incelemek amacıyla ilgili generatörün 3 boyutlu modeli çıkartılmıştır. Bu bağlamda bölünmüş ve kaykık/çarpıklık (skew) verilmiş mıknatıs yapılarının etkileri araştırılmıştır. İlk tasarımda mıknatıs tek parça modellenmiş ve vuruntu torkunun etkin değeri 436,75 mNm olarak bulunmuştur. İkinci tasarımda mıknatıs yüzeyi boyunca belli ölçüde çarpık bir yarık açılmış ve bu işlem vuruntu torkunu 434,58 mNm değerine düşürmüştür. Diğer tasarımda, birinci tasarımdaki mıknatıs iki parçaya bölünmüş ve bölünen mıknatıslar çarpık şekilde tekrar birleştirilmiştir. Böylece vuruntu torkunun değeri 159,60 mNm olarak bulunmuştur. Son olarak, son modeldeki mıknatıs geometrisine belli ölçülerde iki tane yarık açılarak vuruntu torku 89,95 mNm'e kadar düşürülmüştür. Elde edilen sonuçlardan, son tasarımın, ilk tasarıma kıyasla vuruntu torku değerinde %80'e varan bir iyileşme sağladığı sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Vuruntu torku, kaykık/çarpıklık, SMSG, sonlu elemanlar analizi.

## Cogging Torque Minimization Using Skewed and Separated Magnet Geometries

### ABSTRACT

In the study, analytical design, analysis and optimization of a 2.5 kW 14-pole, 84-slot permanent magnet synchronous generator (PMSG) have been performed. The performance characteristics of this PMSG such as efficiency, torque, cogging torque and magnetic flux density are assessed. Then, 3D model of the respective generator is acquired to examine the effect of magnet geometry on the cogging torque produced. In that context, the effects of splitted and skewed magnet structures are examined. In the first design, the magnet is modelled with one piece and the rms value of the cogging torque is found as 436.75 mNm. In the second case, a certain skewed slit is made alongside the magnet and that yields a slightly reduced cogging torque of 434.58 mNm. In the other design, the magnet of the first design is divided into two sub-parts, which are then combined together in a skewed fashion. Thus, the value of cogging torque is found as 159.60 mNm. Eventually, by making two certain slits on the last model, cogging torque is further depressed down to 89.95mNm. It is concluded from the obtained results that the last design contributes an improvement in the value of cogging torque up to 80% compared to the initial design.

### 1. INTRODUCTION

Nowadays, the importance of renewable energy sources increases due to the increasing awareness on the environmental issues and the conflicts in the Middle East area producing high percentage of fossil fuels. In addition to being an environmentally friendly and local solution, intense efforts are underway to utilize the renewables to diversify energy sources [1,2]. When considering renewable energy sources, Turkey is a rich country specifically in terms wind, solar and hydro energy. It ranks first amongst the UE countries in the subject of wind energy potential. Despite all this potential, a large amount of its energy is supplied by fossil fuels, which are

also being imported [3]. By the end of 2017, the installed capacity based on renewable energy sources is 38.743 MW in Turkey. When the distribution of renewable energy resources within the installed power is known as 27.273 MW hydraulic, 6.516 MW wind, 1.028 MW geothermal and 2.653 MW solar energy in this respect. The ministry of energy aims to increase the share of renewable energy in the energy supply and expects to increase, for instance, wind power to 10.000 MW [4-8].

For the wind turbine systems, various kinds of generators are used. The generators can have advantages and disadvantages relative to each other depending on the type and classification. For instance, the permanent magnet synchronous generators (PMSGs) with high power densities are used in increasing scales in the commercial sector. Since PMSGs can be connected to

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : adalcali@bandirma.edu.tr

wind turbines without any gear system, they have been often preferred in wind power plants with low and medium power range [9]. By the discovery of high-performance Neodymium-Iron-Boron magnets and developments in power electronic, permanent magnet (PM) synchronous machines have shown rapid development. Indeed, PM machines are preferred for their low speed and variable speed applications. Since the parameters such as efficiency and power coefficient are independent of rotation speed in the performance of PM machine, the machines can suit for low cycle applications [10-13]. In addition to its advantages, one of the major disadvantages of PM machines is the generation of cogging torque. The cogging torque on electric machines is the torque that is generated by the interaction between the stator slots and the permanent magnets which make up the rotor magnetic field when the phase currents are zero. The value of the cogging torque is independent of the stator current and varies depending on the rotor position and that is undesirable and causes vibration and acoustic noise on the machine.

Many methods exist in the machine literature in order to reduce the cogging torque. In fact, those methods for cogging torque reduction can be classified into two main groups: Machine-based and control-based. Optimization of cogging torque can be accomplished by skewing stator slots or rotor magnets, injection the harmonic current, changing the embrace and offset of the magnet, designing a fractional slot, and adding additional slots or teeth [11,14-17]. In terms of control method, the torque harmonic spectrum of a 12/10 pole machine is investigated for the optimization of the cogging torque. To compensate for the harmonic components, an additional torque component is applied to the machine beside the current harmonics. Both simulations and experiments proved the effectiveness of those methods [18]. However, the effectiveness of these methods is often poor, practically [19].

Machine - based work can be divided into two groups: Stator and rotor magnets. In the literature, the authors studied the cogging torque of 5 different PM machines with different groove counts due to the rotor position. It was found that the motor with the fractional - slot winding structure leads to low cogging torque, however the average torque was decreased [20]. For the study made on the stator slots, three different anti-notch geometries were added and an optimization was ascertained. In other finite element studies, the cogging torque value was decreased by examining the effect of the anti-notch form with a semi-cylindrical structure [21]. In PMSGs, the cogging torque can be optimized by using the finite element method (FEM) to skew the stator slots. For instance, Tseng et al. [22] found that cogging torque is reduced by 89% compared to the straight slot structure by using the Taguchi method.

When the studies on the magnet part are examined, the decrease in the cogging torque by obtaining the overlaid form of the opposite electromotive force harmonic components was ascertained by changing the magnet

shape similar to the study [18]. It was found that, the cogging torque was reduced by 90% in the third harmonic superimposed structure and it also reduced the fluctuations in the output torque [23]. However, the difficulty of applying the desired form to the magnet structure should not be ignored in this study. In a similar study, aimed the exploration of the effect of the structures with the rounded edge magnet on the cogging torque of the PMSG, an optimization on the air gap was applied. With the proposed method, the change in the reluctance was minimized and the cogging torque value was reduced by 40% [9]. It was determined that the magnetic pole eccentric reduced the torque by reducing the air-gap harmonic components. In addition, the magnetic pole structure reduced the fluctuation in the cogging torque [24].

In the present study, a 2.5 kW, 14 pole surface mounted PM synchronous generator has been designed and the cogging torque calculations have been performed for various structures of PM magnets, which can be produced easily by rare-earth elements. After an initial design stage, a 3D model of the generator has been created for the finite element analysis and the rotor magnets are designed with multi-step magnet-skew and a skewed slit to test and optimize the most suitable cogging torque value.

In that frame, this paper is structured as follows: Initially, the design parameters of the generator, the material information, the 3D model, the winding structure and the mesh structure are discussed in the second section. In addition, the definition of the cogging torque in a PM machine, reduction methods and mathematical model are presented. In Section 3, new models of generator and cogging torque values of these structures are obtained. Finally, the conclusion is given in section IV.

## 2. SPECIFICATION OF THE DESIGNED PM GENERATOR

PMSG design starts with the generator sizing equations. The output equation of the generator is given by Equation 1.

$$S = 11.K_{w1} \cdot \bar{B} \cdot ac \cdot \left(\frac{D}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{L}{1000}\right) \cdot n \quad (1)$$

In the equation,  $S$  is the power,  $K_{w1}$  the winding factor,  $\bar{B}$  the specific magnetic loading,  $D$  the stator outer diameter,  $L$  the stack length of the generator and  $ac$  the specific electrical loading.  $ac$  depends on variables such as nominal power, frequency and nominal voltage, and is expressed by Equation 2.

$$ac = \frac{(\delta a_z) Z}{\pi D} \quad (2)$$

During the design phase, specific magnetic loading and specific electric loading are selected by the designer. The

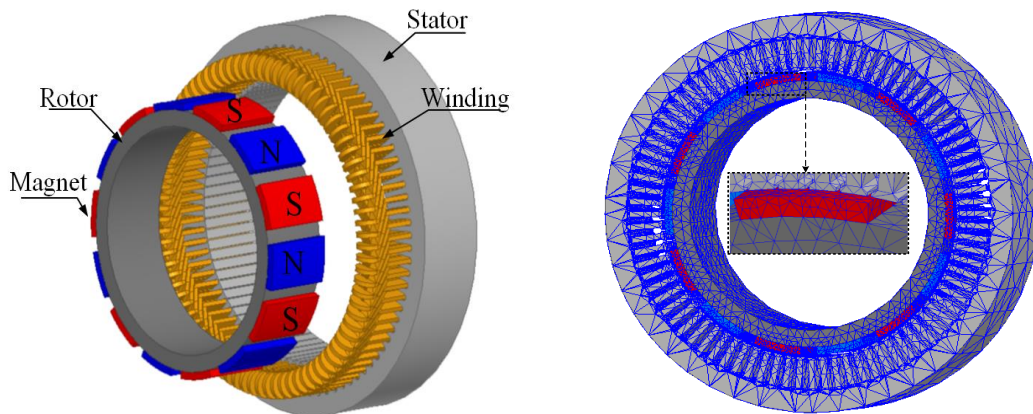
hysteresis and eddy current losses, saturation point, stray losses, cooling type and load profile of the materials used are important variables while selecting magnetic loading. On the other hand, copper loss, cooling type, insulator and load profile are taken into consideration for selecting electrical loading [25].

The generator used in the current study is a direct drive, inner rotor, radial flux and PM structure. PMSGs are machines with high efficiency, easy production, low torque fluctuation and high-power density. PM generators can be directly connected to the wind turbines without any gear system and that superiority makes the PMSGs frequently used in wind turbines [26]. The design parameters of the generator are summarized in Table 1.

**Table 1.** Design parameters of PMSG

Parameter	Unit	Value
Rated Power	kW	2.5
Rated Speed	rpm	428.5
Rated Voltage	V	120
Magnet Material	-	N35
Stator-Rotor Material	-	M19
Stator Outer Diameter	mm	280
Air-gap	mm	0.8
Length of Stator	mm	54
Pole Number	-	14
Number of Slots	-	84

3D model for an initial design, the stator winding connection and the mesh structure used in the analysis of the finite element method are given in Figure 1.



**Figure 1.** The designed generator with Model 1 magnet type

### 3. COGGING TORQUE OF THE PM GENERATOR

Cogging torque in the PM machines is caused by the magnetic interaction between the stator and the magnets placed on the rotors. This effect is undesirable as it produces noise and vibration in PM machines. The high value of the cogging torque prevents rotor rotation and thereby it exhibits resistant to generate electricity at low wind speeds [27]. In the literature, there are many methods for the minimization of cogging torque, such as lot skewing, magnet skewing, closed slot, unequal pole width, pole arc optimization and auxiliary slots. Cogging torque can be written as a function of the reluctance, the air-gap flux and the rotor position and expressed by Equation 3 [28].

$$T_{cog} = \frac{1}{2} \phi_g^2 \frac{d\mathfrak{R}}{d\theta} \quad (3)$$

In Equation 3,  $\phi_g$  expresses the amount of air-gap flux,  $\mathfrak{R}$  air-gap reluctance and  $\theta$  rotor position. As seen from

the equation, the cogging torque is the interaction of the magnets (i.e. air-gap flux) and the stator teeth (i.e. the source of the variable air - gap reluctance). Periodically change in the reluctance of the air gap also causes a cogging torque which changes periodically. Due to this periodic variation, the value of the cogging torque can be calculated from Equation 4 with the Fourier series,

$$T_{cog} = \sum_{k=1}^{\infty} T_{mk} \sin(mk\theta) \quad (4)$$

In the equation,  $m$ ,  $k$  and  $T_{mk}$  denote the number of rotor poles and the smallest number of stator slot numbers, an integer and a Fourier coefficient. The finite element analysis is applied, while there is no current in the stator of the generator of the 3D model. In those analyzes, the torque variation is obtained according to the rotor position of the initial designed generator (Figure 2).

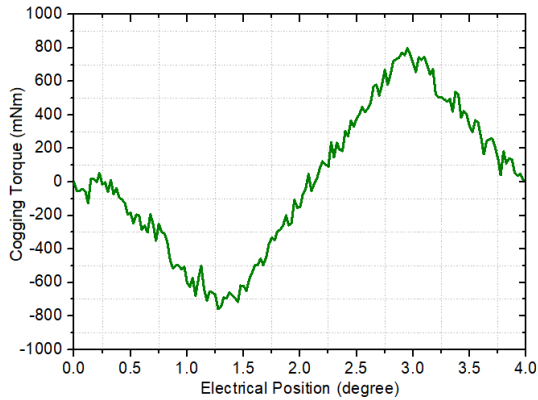


Figure 2. Cogging torque waveform of the initial design

In the first design (i.e. Model 1) the magnet is designed as a single piece and the rms value of the cogging torque is obtained according to the rotor position as 436.75 mNm.

#### 4. FEM ANALYSIS OF PM GENERATOR

The analysis of electric machines includes a complicated solution and an interrelated problem. It is possible to create the desired design by using an approximation method and a computer software working parallel with the finite difference and finite element methods. By applying a FEM to machine design, it is possible to determine the electromagnetic parameters at a very high accuracy in that manner [29-31]. Finite element analysis was developed to find approximate numerical solutions of the magnitudes that are continuous in a particular region such as the fields and their variations on the

studied region. Then the solution can be expressed by partial differential equations in accordance with the Maxwell's equations. In this method, the region to be solved is divided into small regions with a finite number to read the data. For each node in the region, a cumulative solution value is calculated within a certain error limit. By operating the method, an iteration to reduce that error is applied to the nodes. In many packages, that can be adjustable to ascertain the desired numerical accuracy [32].

Both 2D and 3D models of the machine are designed and finite element analysis is performed with computer aided design program. The use of FEM provides the designer with time and economic benefits. The application of the FEM to machine design ensures that critical design parameters such as cogging torque, winding voltages, and induced torque of the machine are determined with very high accuracy. In order to optimize the cogging torque of the generator, which passed the initial design, rotor magnets were designed with two pairs of pieces and a skewed slit.

In permanent magnet machines cogging torque can be suppressed by partitioning the magnets off in the axial axis. In the present study, the rotor pertaining to models 3 and 4 is designed in two-stage structure. The mechanical magnitude of skew angle of the magnet piece is calculated by Eq. 5 [33].

$$\theta = \frac{360}{2 \times Z} \quad (5)$$

Where  $Z$  stands for the number of stator slots. In view of this, the skew angle of our design is computed as  $2.14^\circ$ . The structures formed are given in Figure 3.

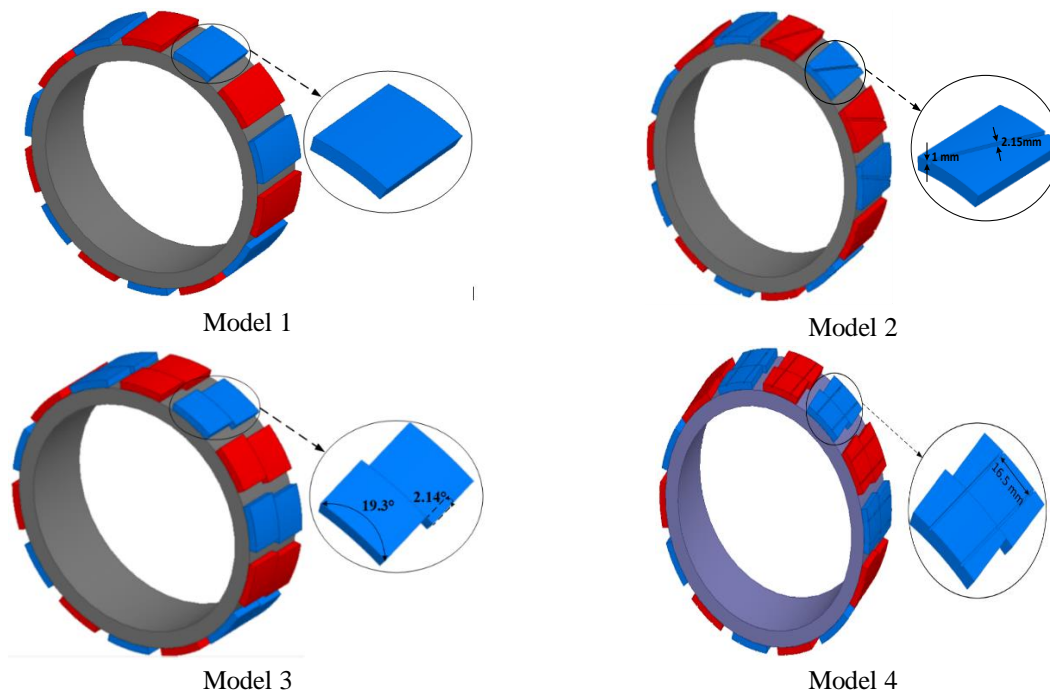
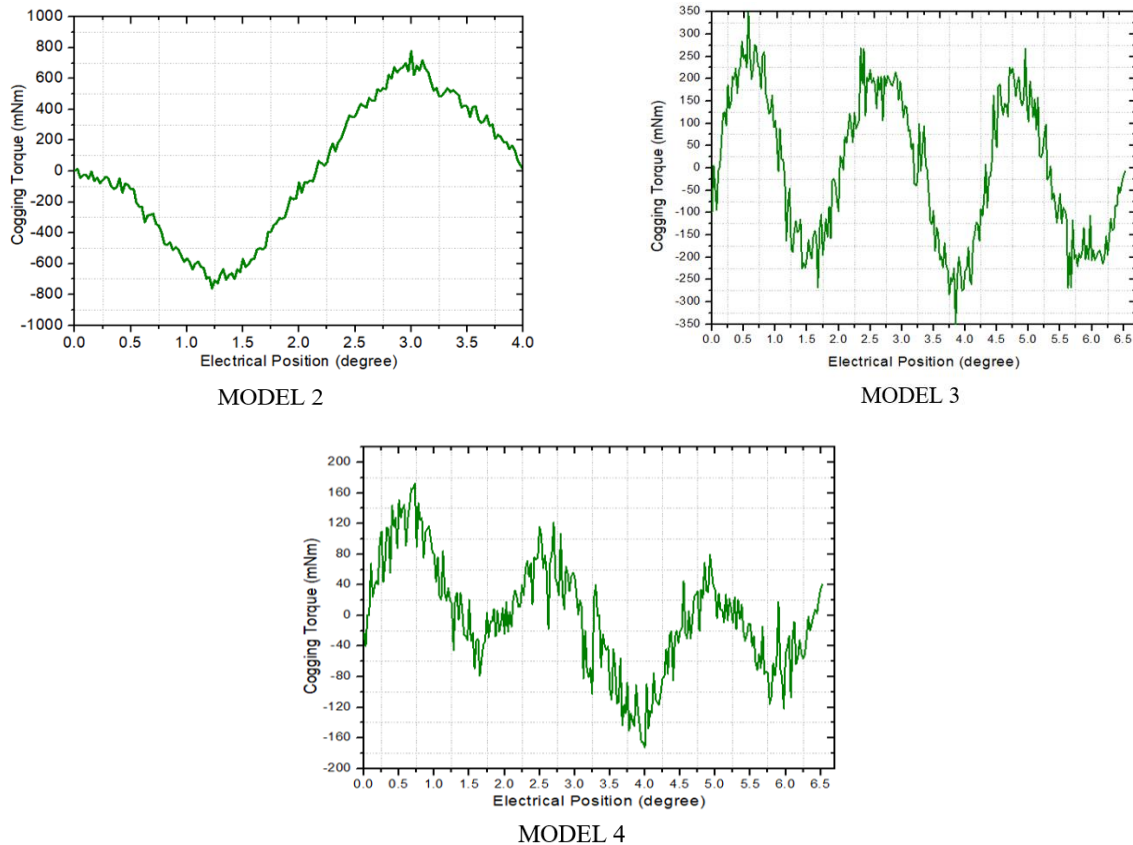


Figure 3. The designed magnet structures

When the designed magnets are examined, Model 2 is formed by opening a notch in the first designed magnet. Model 3 is formed by dividing the magnet into two equal parts in axial direction and half of the magnet part is shifted about half-slot in angular direction in accordance

with cylindrical coordinates. Finally, the magnets configured in Model 4 are derived from Model 3 by having additional 2 notches. The simulation results for the cogging torque are given in Figure 4.



**Figure 4.** Cogging torque waveforms versus rotor electrical position for three different configurations

The rms values of the cogging torque from the simulations are summarized in Table 2. By designing the magnet in a piece structure leads to a significant reduction in cogging torque. The final design has improved by up to 80% according to the first design.

**Table 2.** RMS value of cogging torque

Model	Rms value
Model 1(initial design)	436.75 mNm
Model 2	434.58 mNm
Model 3	159.60 mNm
Model 3	89.95 mNm

It is obvious that the proposed new cogging torque reduction method is very effective for the radial flux PM machines and that yields to better power generation mechanism for the wind turbines even for lower wind rates and increases the productivity of the turbines. Taking benefits of the detailed transient analyses, output powers of the designs are tabulated in Table 3 from which

it is seen that the output power of the proposed model is decreased by 2.76% with regard to classical Model 1.

**Table 3.** Power values of models

Model	Value
Model 1(initial design)	2500 W
Model 2	2462 W
Model 3	2455 W
Model 3	2431 W

The magnetic field can be expressed by Maxwell's equations in a permanent magnet synchronous generator;

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{aligned} \tag{6}$$

In the equation,  $\vec{J}$  is current density,  $\vec{H}$  magnetic field strength,  $\vec{B}$  magnetic flux density,  $\vec{E}$  electric field strength. The basic formulation of the vector potential for the magnetic field is expressed by Equation 7

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \vec{A}) = \vec{J} \quad (7)$$

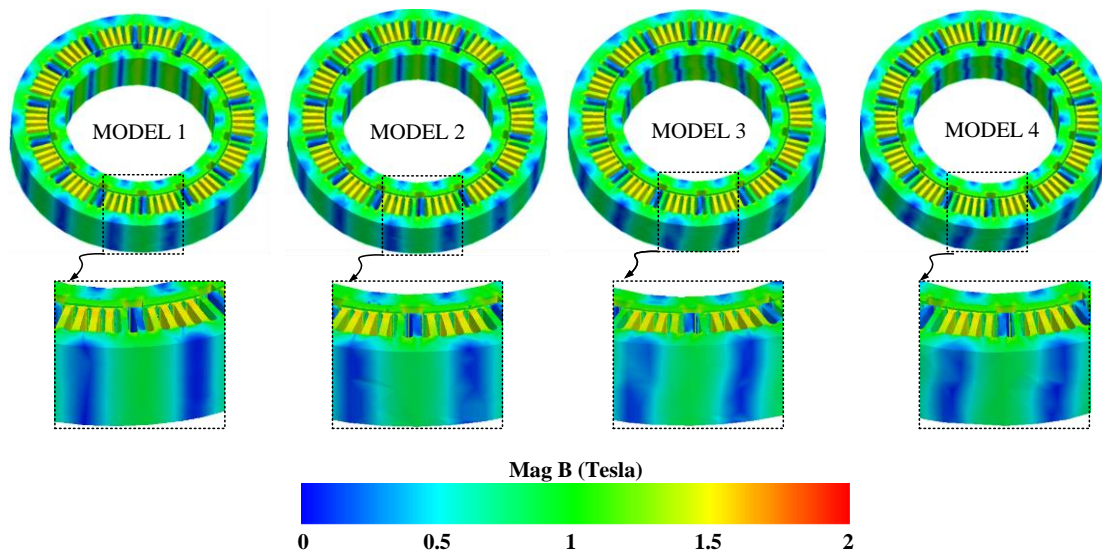
Here in  $\nu$ , which is given by  $\nu = \partial B / \partial H$  exhibits variable permeability owing to the nonlinearity of  $B = f(H)$ . The flux density distribution of the generators in Figure 5 and 6 can be expressed by Equations 8 and 9.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \frac{\partial A}{\partial z} \right) = \vec{J} \quad (8)$$

The magnetic flux density value is calculated from Equation 8 in 3D analyses [34].

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (9)$$

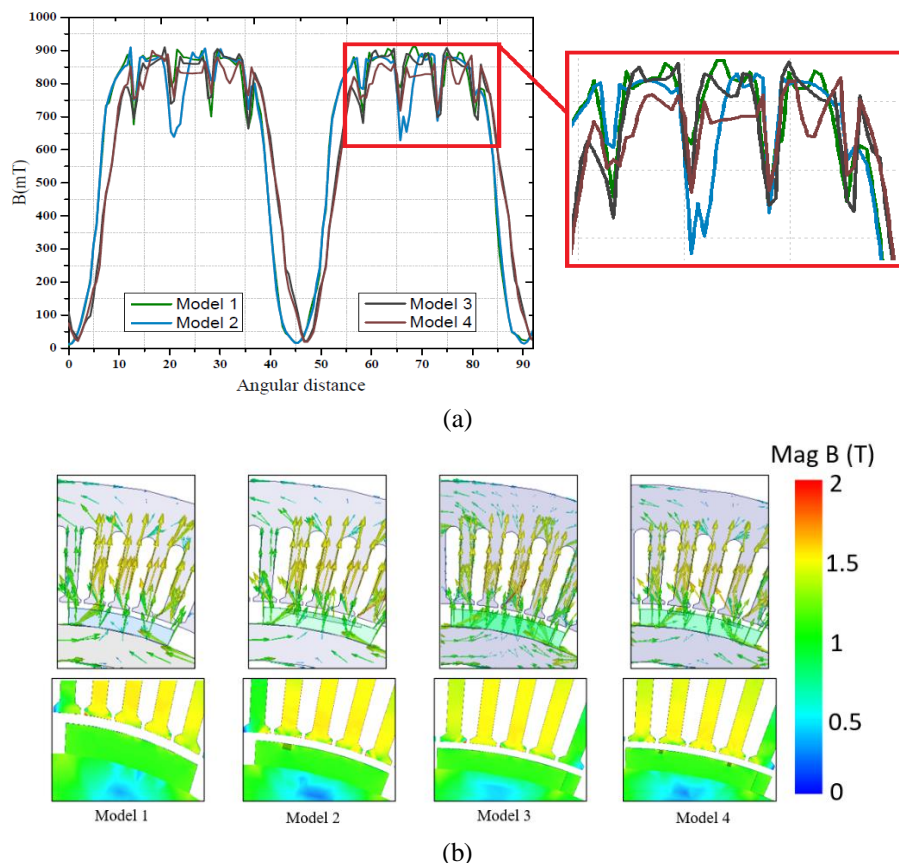
The flux density distributions obtained from the 3D electromagnetic analyses of the designed generators are given in Figure 5 for overall angular and radial geometry. Indeed, four plots indicate similar flux structures especially for the vicinities of cores and magnets. Thus, that result proves the reliability of the studied models. Especially at the vicinity of cores,  $B=1.5$  T flux densities are achieved and indicated by a yellow colour in the coloured version of the paper. The main difference among the models is that the maximal fluxes are obtained with skewed forms in Model 3 and 4 as it is expected due to the geometries of magnets in Models 3 and 4. On the outer surface of the machine nearly 1.2 T flux density is available in the present models and it is already satisfactory for the use of the designs.



**Figure 5.** Magnetic flux densities of four models

In order to give a comprehensive idea on the air gap flux density along the angular direction, a series of analyses have been performed and the detailed plots have been drawn in Figure 6. According to figures, especially Figure 6(a) gives important results on the studied designs. For instance, for the same mesh structures, while Model 1, 2 and 3 give slightly higher flux densities around 0.705 T, the last model gives  $B=0.690$  T. Indeed, the flux density fluctuations with respect to the angular direction give different characteristics for each model.

Especially for Model 2, which is denoted by blue colour in coloured version, the fluctuations over the angular position is strong. However, the fluctuations for Model 4 is lower compared to the other models. In Figure 6(b), the flux densities at the vicinities of a magnet and the cores are shown on the axial plane for all models. All models show the flux density values of 1.5 T and 1 T on the cores and on the magnet, respectively. These flux densities are sufficiently high for the cross-sectional area of the cores.



**Figure 6.** Flux densities (a) along with the angular position inside the air gap and (b) on the axial plane

## 6. CONCLUSION

New rotor designs with different magnet configurations are performed in order to lower the undesired cogging torque value. The machine (i.e. PMSG) has the power of 2.5 kW and 14-pole as appropriate for house-hold wind turbines. The study has focused on the optimization of the cogging torque, which causes noise and vibration in PM machines and prevents generators from generating electricity at low wind speeds. The rotor magnet has been designed by forming 4 different models such as pieced and notched structures. In the initial design, when the magnet is one piece and without skew and stator current is zero, the rotor position is changed and the rms value of the cogging torque has been obtained as 436.75 mNm. With reference to Model 1, one notch has been opened for each magnet and Model 2 has been created. In Model 2, with a slight change the rms value of cogging torque has been found 434.58 mNm. In Model 3, where the PM is formed by sliding two equal parts and half slot, the cogging torque has been reduced to 159.60 mNm with a rate of 64%. Finally, the Model 4 is designed by producing 2 notches from the magnets in the partitioned structures. In the latter design, the rms value of the cogging torque is calculated as 89.95 mNm, which yields to 80% improvement to the preliminary configuration.

## ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by Scientific Research Project Unit of the Bandırma Onyedi Eylül University under Project No: BAP-18-MF-1009-065.

## REFERENCES

- [1] Dalcalı A. and Akbaba M., "Optimum pole arc offset in permanent magnet synchronous generators for obtaining lowest voltage harmonics", *Scientia Iranica. Transaction D: Computer Science & Engineering and Electrical Engineering*, 24: 3223-3230, (2017).
- [2] Naciri M., Aggour M. and Ahmed W.A., "Wind energy storage by pumped hydro station", *Journal of Energy Systems*, 1: 32-42, (2017).
- [3] Uğurlu A., "An overview of Turkey's renewable energy trend", *Journal of Energy Systems*, 1: 148-158, (2017).
- [4] International Energy Agency, "World Energy Outlook 2014", Paris, France, (2014).
- [5] General Director of Renewable Energy, "2017 Unit Activity Report", Ankara, Turkey, (2018).
- [6] Çakır M.T., "Wind Energy potential of turkey and its place in EU countries", *Journal of Polytechnic*, 13: 287-293, (2010).
- [7] Altın N. and Eyimaya S.E., "A combined energy management algorithm for wind turbine/ battery hybrid system", *Journal of Electronic Materials*, 47: 4430-4436, (2018).



- [8] Sharma M., “Wind energy driven passive solar tracking system”, *Int. J. of Renewable Energy Technology*, 7: 240-245, (2016).
- [9] Yoo J.H., Park C.S. and Jung T.U., “Permanent magnet structure optimization for cogging torque reduction of outer rotor type radial flux permanent magnet generator”, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Miami, FL, USA, (2017).
- [10] Öztürk N., Dalcalı A., Çelik E. and Sakar S., “Cogging torque reduction by optimal design of PM synchronous generator for wind turbines”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 17593-17600, (2017).
- [11] Dai J.C., Hu Y.P., Liu D.S. and Wei J., “Modelling and analysis of direct-driven permanent magnet synchronous generator wind turbine based on wind-rotor neural network model”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 226: 62-72, (2011).
- [12] Lyan O., Jankunas V., Guseinoviene E., Pasilis A., Senulis A., Knolis A. and Kurt E., “Exploration of a permanent magnet synchronous generator with compensated reactance windings in parallel rod configuration”, *Journal of Electronic Materials*, 47: 1-7, (2018).
- [13] Duan J., Fan S., Wu F., Sun L. and Wang G., “Instantaneous power control of a high speed permanent magnet synchronous generator based on a sliding mode observer and a phase locked loop”, *International Journal of Electronics*, 105: 923-940, (2017).
- [14] Zhu X., Hua W., Wu Z., Huang W., Zhang H. and Cheng M., “Analytical approach for cogging torque reduction in flux-switching permanent magnet machines based on magnetomotive force-permeance model”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65: 1965-1979, (2018).
- [15] Ping J., Shuhua F. and Ho. S.L., “Distribution characteristic and combined optimization of maximum cogging torque of surface-mounted permanent-magnet machines”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(3), (2018).
- [16] Chu, W.Q. and Zhu Z.Q., “Investigation of torque ripples in permanent magnet synchronous machines with skewing”, *IEEE Transaction on Magnetics*, 49: 1211-1220, (2013).
- [17] Goryca Z., Padaszynski K and Pakosz A., “Model of the multipolar engine with decreased cogging torque by asymmetrical distribution of the magnets”, *Open Physics*, 16: 42-45, (2018).
- [18] Jia H., Cheng M., Hua W., Yang Z. and Zhang Y., “Compensation of cogging torque for flux-switching permanent magnet motor based on current harmonics injection”, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Miami, FL, USA, 286-291, (2009).
- [19] Hasanien H.M., “Torque ripple minimization of permanent magnet synchronous motor using digital observer controller”, *Energy Conversion and Management*, 51: 98–104, 2010.
- [20] Güemes J.A., Iraolagoitia A.M., Del Hoyo J.I and Fernandez P., “Torque analysis in permanent-magnet synchronous motors: a comparative study”, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 26: 55- 63, (2011).
- [21] Herlina, Setiabudy R. and Rahardjo A., “Cogging torque reduction by modifying stator teeth and permanent magnet shape on a surface mounted PMSG”, *International Seminar on Intelligent Technology and Its Application*, Indonesia, 227-232, (2017).
- [22] Tseng W.T. and Chen W.S., “Design parameters optimization of a permanent magnet synchronous wind generator”. *19th International Conference on Electrical Machines and Systems*, Japan, (2016).
- [23] Liu G., Zeng Y., Zhao W. and Ji J., “Permanent magnet shape using analytical feedback function for torque improvement”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65: 4619- 4630, (2018).
- [24] Qiu H., Hu K., Yu W. and Yang C., “Influence of the magnetic pole shape on the cogging torque of permanent magnet synchronous motor”, *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 14:64-70, (2017).
- [25] Duan Y. “Method for design and optimization of surface mount permanent magnet machines and induction machines”, *PhD diss.*, Georgia Institute of Technology, 2010.
- [26] Zala B.O. and Pugachov V., “Methods to Reduce cogging torque of permanent magnet synchronous generator used in wind power Plants”, *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 23: 43-48, (2017).
- [27] Ou J., Liu Y., Qu R. and Doppelbauer M., “Experimental and theoretical research on cogging torque of PM synchronous motors considering manufacturing tolerances”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65: 3772-3783, (2018).
- [28] Dosiek L. and Pillay R., “Cogging torque reduction in permanent magnet machines”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43: 1565-1570 (2007).
- [29] Ho S.-L. and Fu W.N., “Review and future application of finite element methods in induction motors”, *Electric Machines & Power Systems*, 26: 111–125, (1998).
- [30] Bouloukza I., Mordjaoui Mm, Kurt E., Bal G. and Ökmen Ç., “Electromagnetic design of a new radial flux permanent magnet motor”, *Journal of Energy Systems*, 2: 13-27, (2018).
- [31] Faiz J., Ebrahimi B.M. and Sharifian M.B.B., “Finite Element transient analysis of an on-load three-phase squirrel-cage induction motor with static eccentricity”, *Electromagnetics*, 27: 207-227, (2007).
- [32] Kurt E., Gör H. and Döner U., “Electromagnetic design of a new axial and radial flux generator with the rotor back-irons”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41: 7019-7026, (2016).
- [33] Lin H., Wang D., Liu D. and Chen J., “Influence of magnet shape on torque behavior in surface-mounted permanent magnet motor”, *17th International Conference on Electrical Machines and Systems*, China, (2014).
- [34] Dalcalı A. and Akbaba, M., “Comparison of 2D and 3D magnetic field analysis of single-phase shaded pole induction motors”, *Engineering Science and Technology, An International Journal*, 19: 1-7, (2016).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Development of a design methodology for a centrifugal compressor with the utilization of CFD

*Radyal bir kompresör için HAD yardımıyla tasarım metodolojisi geliştirilmesi*

*Yazarlar (Authors): Fatma Zeynep AYTAÇ<sup>1</sup>, Nuri YÜCEL<sup>2</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-0717-5287*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-9390-5877*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Aytaç F. Z. and Yücel N., “Development of a design methodology for a centrifugal compressor with the utilization of CFD”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 231-239, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.658358

# Radyal Bir Kompresör için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yardımıyla Tasarım Metodolojisi Geliştirilmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Fatma Zeynep AYTAÇ\***, **Nuri YÜCEL**

Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 11.03.2019 ; Kabul/Accepted : 24.06.2019)

## ÖZ

Radyal kompresörler günümüzde çeşitli amaçlar için belirli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Havacılık ve savunma sektörlerinde ise çeşitli motor yapılarında akışkanın basıncını artırmak için kullanılmaktadır. Mevcut çalışmada, bir mini jet radyal kompresörü, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) araçları kullanılarak, geliştirilen metodoloji ile tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan kompresörün üretimi yapılmış ve yerli bir motor kullanılarak testi gerçekleştirilmiştir. Tasarım spesifikasyonları, test için kullanılan motor doğrultusunda belirlenmiş ve sonuçta belirlenen limitler içerisinde, 0.678 kg/s hava debisi, 6.6135 toplam basınç oranı ve %92.38 verim elde edilmiştir. Test sonucunda ise her ne kadar HAD sonuçları ve deney sonuçları arasında farklılık gözlemleniyse de, elde edilen eğrilerin genel eğiliminin benzer olduğu gözlemlenmiş ve tasarım doğrulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Radyal kompresör, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, tasarım metodolojisi, kompresör testi.

## Development of a Design Methodology for a Centrifugal Compressor with the Utilization of CFD

### ABSTRACT

Centrifugal compressors are widely used for several purposes in many industries. Aero defense industry uses these compressors in the engines of several structures. In the present study, the centrifugal compressor of a mini jet engine is designed with the utilization of Computational Fluid Dynamics (CFD) tools with the methodology developed. The designed compressor is manufactured and its tests were conducted using an engine that is being utilized commercially. The performance parameters of the designed compressor and the results obtained from the engine were compared and presented. The specifications of the designed compressor was determined in the light of the requirements of the test engine. It was observed that the obtained mass flow rate (0.678 kg/s), pressure ratio (4.6135) and the efficiency (92.38%) values are within the limits of the design specifications and the although there is a slight difference between the results of the CFD analyses and the experiments, the trends of the curves are consistent with each other.

**Keywords:** Centrifugal compressor, computational fluid dynamics, design methodology, compressor tests.

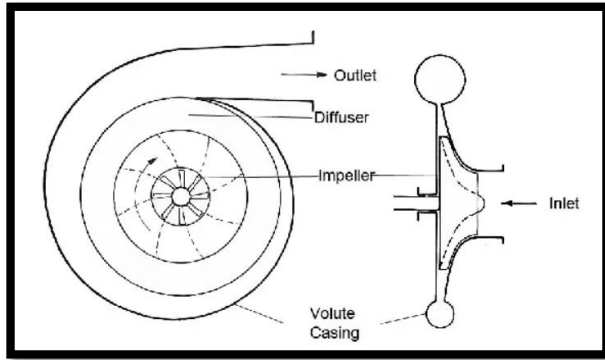
### 1. INTRODUCTION

Today, centrifugal compressors are widely used in many industries for several reasons such as aircraft industry for fluid compression, in gas turbines and in turbocharged combustion engines, etc [1]. Centrifugal compressors mainly increase the kinetic energy of the fluid within using a rotating impeller [2]. It is a mechanical device which is able to transfer the energy efficiently to the fluid medium so that it can be delivered in large quantities at several multiples of inlet pressure [3]. There are several advantages of centrifugal compressors to be preferred, such as their robustness, compactness, reliance, resistance to foreign object damage and wider operating range [3].

### 1.1. Basic Components

A centrifugal impeller has three main parts; the impeller, diffuser and the scroll. If the compressor has any inlet guide vanes, they are responsible from directing the fluid to the impeller in the right angle. Afterwards, the impeller increases the kinetic energy of the fluid in addition to the increment in the total and static pressures. Then, the fluid leaves the impeller and reaches to the diffuser, where its velocity is decreased and its static pressure is increased and the diffuser discharges the fluid to the scroll. The main idea of the design is to compress the fluid in the required amount while minimizing losses. The basic schematic of a centrifugal compressor is given in Figure 1.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : zeynepaytac@gazi.edu.tr



**Figure 1.** Schematic of a centrifugal compressor [4]

One can prefer two-dimensional or three-dimensional blade profiles while designing the impeller blades. While 2D-impellers are compatible for individual and small-scale production, 3D impellers provide the highest durability at high blade velocities and they are more effective at high Mach numbers and respectively big loading factors [5].

Respectively high pressure ratios in a centrifugal compressor end up in complicated flow characteristics which causes shock waves and finally they result in the deterioration of efficiency and operating range [6].

Compressor operating range is determined from the performance map which has the choke line and the surge line as the boundaries of the map. Performance map consists of efficiency lines determined in several rotating speeds between the surge and choke points at that speed. Here, surge is the phenomenon which occurs when the compressor is unable to produce the sufficient pressure to provide the continuous flow to the rest of the system. It is assumed that surge occurs below the minimum mass flow rate that the compressor can still operate with. Decreasing the mass flow further will result in surge which will lead to aerodynamic instabilities and finally in mechanical damage. Oppositely, choke point is the point where the compressor operates with the maximum mass flow rate of fluid; increasing the mass flow further will not serve the compressor's purpose and it will not be compressing the fluid any more. The designer should aim to maximize the distance between the choke and surge points while keeping the efficiency as high as possible.

In the present study, the design of a centrifugal compressor for a mini jet with the utilization of CFD tools is implemented and the designed compressor is manufactured. Using the manufactured compressor, the tests are conducted and later, the obtained results of the CFD analyses and the tests are compared with each other.

## 1.2. Utilization of CFD for Impeller Design

In the preliminary design process, one can only determine the inlet and outlet velocity triangles, blade angles and shapes. The intimate 3D profile of the blade is generated and analyzed by means of Computational Fluid Dynamics (CFD) tools. Today, as designing the

impeller using experimental methods can be infeasible for many researchers, CFD tools are increasingly used in the design process of turbo machines; which provides the designer to save on effort, time and cost. CFD tools offers the designer a cost-effective and accurate way to get through the design process with respect to experimental methods [7]. However; due to the complex flow nature of these structures, the importance of the developed case becomes substantial in terms of accuracy.

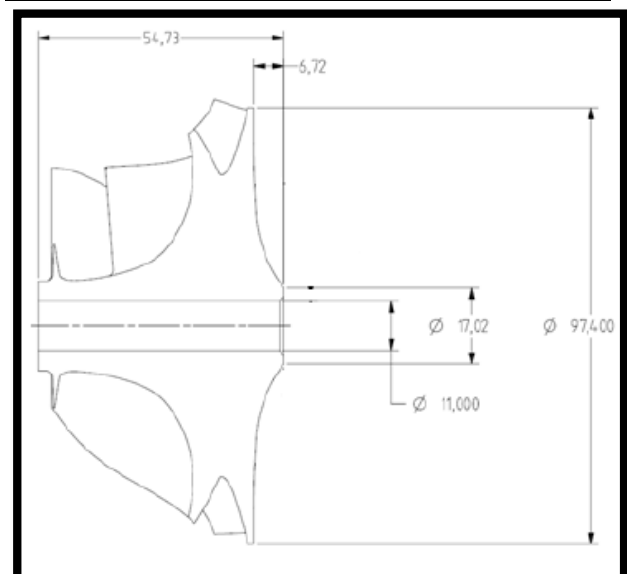
## 1.3. Specifications of the Compressor

### 1.3.1. Dimensional Specifications

The dimensional specifications of the designed compressor is given in Table 1. The design procedure is conducted in the light of the specified information of several dimensions and tip profile. The fixed dimensions is given in Figure 2 and the specified tip profile is given in Figure 3.

**Table 1.** The dimensional specifications

Rotation Direction	The compressor is required to rotate clockwise from front view.
Dimensions	The fixed dimensions of the compressor are given in Figure 2.
Tip Profile	The tip profile of the compressor is fixed and is given in Figure 3.
Blade Number	The number of the blades is not allowed to be multiples of 6 or 8.
Weight	260 ± 15 g.
Material	Aluminum 2124 Alloy.



**Figure 2.** The specified dimensions of the compressor

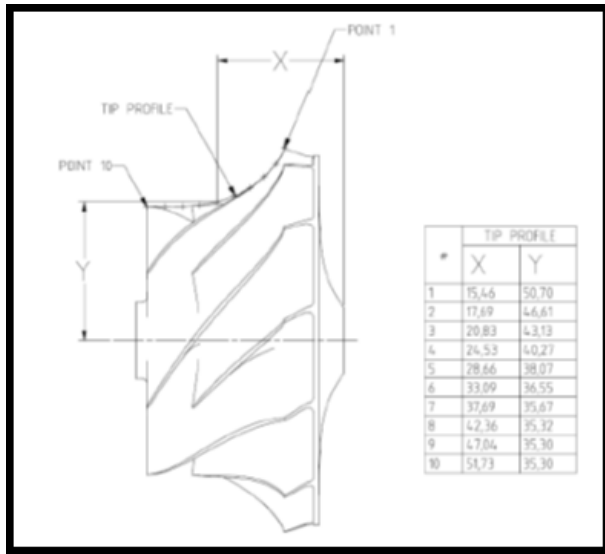


Figure 3. The required tip profile

1.3.2. Aerodynamic Specifications

The compressor is designed at sea level (101.325 kPa and 15°C) and the requirements are given in Table 2.

Table 2. The design inputs and requirements at design point

Design Inputs	Shaft Velocity	96000 rpm
	Inlet Total Pressure	101325 Pa
	Inlet Total Temperature	288.15 K
Design Requirements	Air Mass Flow Rate	0.68 ± 0.01 kg/s
	Total Pressure Ratio	4.6 ± 0.05
	Isentropic Efficiency	≥ 0.87
	Surge Margin	≥ 15

Surge margin is calculated according to Equation 1.

$$\left( \frac{PR_{stall}}{PR_{design}} \times \frac{\dot{m}_{design}}{\dot{m}_{stall}} - 1 \right) \times 100 \quad (1)$$

2. MATERIAL AND METHOD

Each centrifugal compressor has its own design inputs and requirements depending on the purpose of utilization. Consequently, even though certain dimensions such as exducer diameter, blade height etc. can be the same, each compressor has a unique design. In order to simplify the design process, a design methodology is developed in the light of the research about centrifugal compressor theory, 3D design programs and CFD and FEA tools. Using the methodology given in Figure 4, different compressors for

various purposes can be designed parametrically in a simple and systematic way.

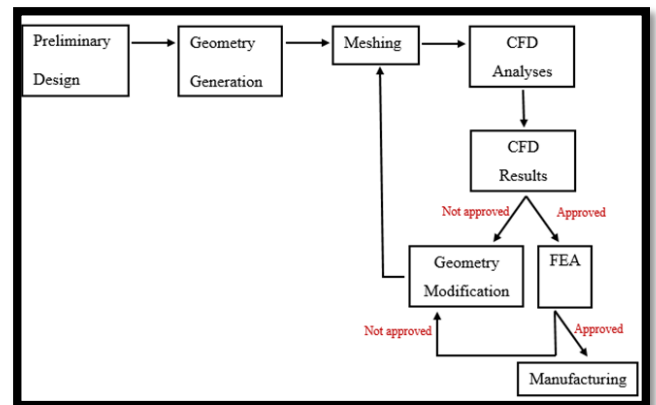


Figure 4. The outline of the design methodology

2.1. Preliminary Design

In order to generate the initial blade profile, it is necessary to determine the velocity triangles at the inlet hub, inlet shroud and outlet sections. To determine the velocity triangles, certain thermodynamic parameters such as total and static temperatures, total and static pressures, total and static densities and Mach numbers are calculated at the inlet and outlet. The calculated values are given in Table 3. It is assumed that the isentropic efficiency of the rotor is 87% and the air enters the impeller in a pure axial direction (no pre-whirl).

Table 3. The calculated thermodynamic parameters

Parameter	Value	Unit
P <sub>1</sub>	84064.034	Pa
P <sub>2</sub>	263349.065	Pa
P <sub>02</sub>	466095	Pa
T <sub>1</sub>	273.243	K
T <sub>2</sub>	398.743	K
T <sub>02</sub>	469.39	K
ρ <sub>1</sub>	1.072	kg/m <sup>3</sup>
ρ <sub>2</sub>	2.307	kg/m <sup>3</sup>
ρ <sub>02</sub>	3.459	kg/m <sup>3</sup>

The velocity triangles at the inlet hub, inlet shroud, inlet mean line and outlet sections are given in Figure 5. By taking into consideration the theoretical calculations and specifications, it was decided that the rotor has 7 main blades and 7 splitter blades.

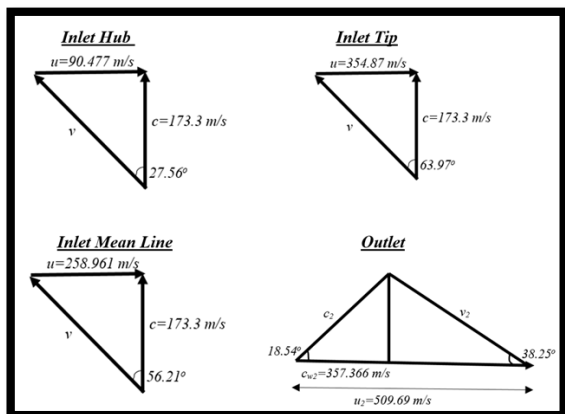


Figure 5. The velocity triangles

### 2.2. Geometry and Grid Generation

After the determination of the velocity triangles and blade angles, the next step is to generate the geometry. In this study, ANSYS Workbench 15.0 is used throughout the design process. The BladeGen module of the mentioned tool was utilized in order to generate the initial 2D blade geometry. The blade geometry (height, inducer diameter, exducer diameter, inlet and outlet blade angles, etc.) was formed in the light of the theoretical calculations, whereas the required tip profile and tip clearance value was dictated to the tool. In addition, blade thickness was determined so as to ensure the required aerodynamic and structural specifications. The 2D profile of the blade is given in Figure 6.

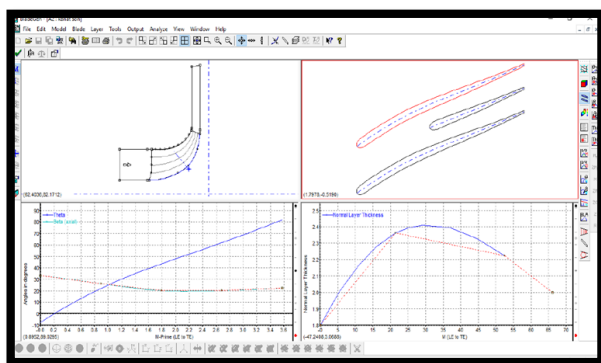


Figure 6. The ANSYS BladeGen view of the 2D blade profile

Here, the top left view represents the meridional profile of the blade. The left base view is the blade angle distribution window. With the help of this section, one can delicately change the blade angles at any sections. The base right window represents the blade thickness distribution; whereas the top right view is the blade-to-blade view of the compressor.

After the completion of the design process in BladeGen tool, the blade was divided into finite elements by using ANSYS TurboGrid. Here, by providing the enough number and quality of the solution grids, the accuracy of

the solution is ensured. To determine the sufficient number After the completion of the design process in BladeGen tool, the blade was divided into finite elements by using ANSYS TurboGrid. Here, by providing the enough number and quality of the solution grids, the accuracy of the solution is ensured. To determine the sufficient number of grid cells, a mesh independence study was conducted and it was found out that approximately 900000 cells are enough to obtain an accurate solution. The mesh data is given in Table 4.

Table 4. Mesh Data

Number of Nodes (Total)	Number of Elements (Total)
1052236	991070

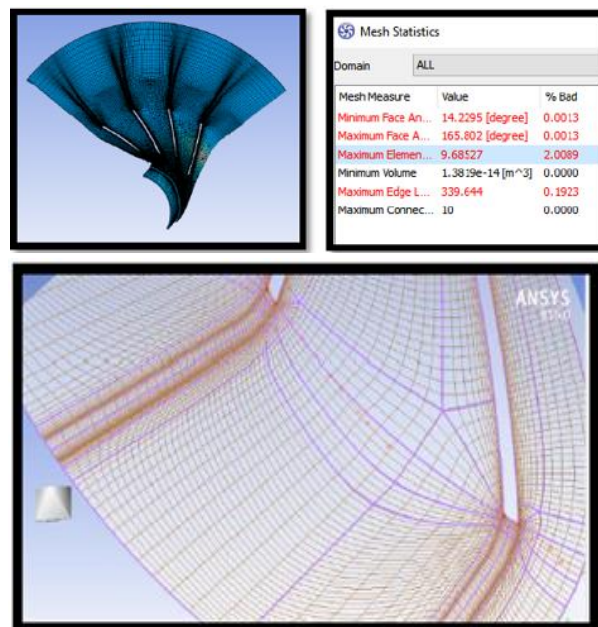


Figure 7. Blade grid structure

When generating the grid structure, special effort is made so that the mesh is enough dense near the boundary layer and becoming less dense gradually when getting away from that region. As can be seen from the mesh statistics in Figure 7, the error is negligible throughout the whole volume and the grids in the critical regions are denser with respect to other domains.

After the completion of the meshing process, ANSYS CFX 15 is used to set up the analysis.

### 2.3. Solver Settings and CFD Analyses

Navier – Stokes equations are sufficient to model the 3D motion of the fluid particle without any extra information needed.

### 2.3.1. Conservation of Mass

Consider a fluid particle having dimensions of  $dx$ ,  $dy$  and  $dz$ . The mass conservation for such a particle is expressed with Equation 2. It states that the variation of net mass flow within a flow element is equal to the net mass flux passing through the boundaries of the element.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

### 2.3.2. Conservation of Momentum

Momentum conservation states that the amount of momentum variation on the unit mass of a fluid particle is equal to the sum of pressure variations, viscous forces and external forces. It is given in Equation 3.

$$\frac{D(u_i)}{Dt} = \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + F_i \quad (3)$$

The flow within the centrifugal compressor is simulated using Reynolds Averaged Navier – Stokes (RANS) equations. RANS methods are widely used in industrial applications [8]. In Reynolds averaging, the actual solution variables in Navier – Stokes equations are averaged depending on time after being decomposed into average and fluctuating components. The final equations are given in Equation 4.1, 4.2 and 4.3 in terms of  $x$ ,  $y$  and  $z$  axes.

x-component:

$$\rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = \rho \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}^2) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{u}\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{u}\bar{w}) \right] = \rho g_x - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \rho \overline{u'u'^2} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \rho \overline{u'w'} \right] \quad (4.1)$$

y-component:

$$\rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = \rho \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}^2) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{v}\bar{w}) \right] = \rho g_y - \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \rho \overline{u'v'} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \rho \overline{v'v'^2} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} - \rho \overline{v'w'} \right] \quad (4.2)$$

z-component:

$$\rho \frac{D\bar{w}}{Dt} = \rho \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}\bar{w}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}\bar{w}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{w}^2) \right] = \rho g_z - \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} - \rho \overline{u'w'} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} - \rho \overline{v'w'} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} - \rho \overline{w'w'^2} \right] \quad (4.3)$$

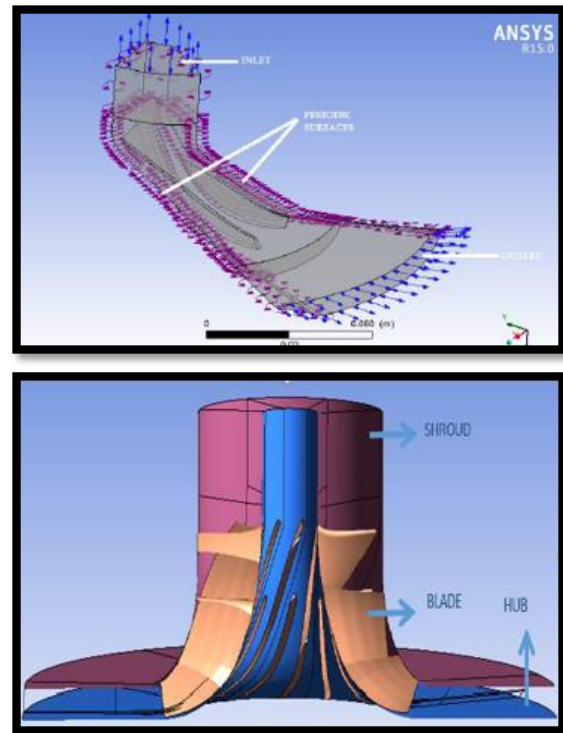
### 2.3.3. Turbulence Model

Turbulence consists of fluctuations in time and space in flow area. It is a 3D, time-dependent and highly complex structure which can cause in distinct variations in flow characteristics. It appears when the inertial forces overcome viscous forces on a fluid. Although it is simplified by the conservation equations and the averaging procedure, these equations are not sufficient to resolve the flow accurately. As a result, the two equations coming from turbulence models are required to solve the flow accurately in addition to RANS equations. On the present study,  $k-\omega$  SST model is used with the RANS

equations. It is widely preferred in turbo machinery simulations involving rotating structures. Although standard  $k-\omega$  model over predicts separation,  $k-\omega$  SST does not face with this problem.

### 2.3.4. Simulation

ANSYS CFX-Pre is used to set up the analyses and ANSYS CFX Solver is used to run the cases. The regions used to define the boundary conditions are given in Figure 8.



**Figure 8.** The regions used for setting up the boundary conditions for the CFD analyses

To reduce the computation time and effort, only one passage consisting of one main blade and one splitter is used and as can be seen from Figure 8, periodic surfaces are defined at each side of the passage. The inlet and outlet boundary types are selected as “Opening”. As the rotation speed of the compressor is notably high, CFX compels these regions to be inlet and outlet when these types are selected. When “inlet” and “outlet” type boundaries are selected, backflow occurs, which deteriorates the performance and so, the required flow and performance goals cannot be achieved. By choosing this boundary types as “Opening”, the obligations on the flow disappear and more realistic results are obtained.

As given, a pressure of 101.325 kPa and a temperature of 288.15 K is given at the inlet and a pressure of 360 kPa and 470 K is given at the outlet. The values given at the outlet region is determined from the theoretical calculations. The reference pressure is chosen as 0 atm. The fluid is air – ideal gas and the rotational speed is

96000 rpm. As known from literature that  $k-\omega$  SST turbulence model is more accurate for rotating structures, this model is used for the analyses, as mentioned before. The residual target is specified as 10-8. Furthermore, several monitor points was used to monitor the mass flow rate value at the outlet and to monitor the total pressure rate in order to check the convergence.

After setting up the cases, analyses were conducted using CFX Solver Manager and the results are evaluated. The analyses are repeated in a systematic manner until the required performance and flow characteristics are obtained.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

After the completion of the analyses, the post-process was conducted using ANSYS CFX-Post. The obtained compressor performance results are given in Figure 9.

Rotation Speed	10053.1000	[radian s <sup>-1</sup> ]
Mass Flow Rate	0.6780	[kg s <sup>-1</sup> ]
Inlet Volume Flow Rate	0.5844	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
Input Power	123408.0000	[W]
Reference Radius	0.0493	[m]
Inlet Flow Coefficient	0.1211	
Exit Flow Coefficient	0.2780	
Head Coefficient	2.5869	
Work Input Coefficient	0.7402	
Total Pressure Ratio	4.6135	
Total Temperature Ratio	1.5933	
Total Isentropic Efficiency %	92.3842	
Total Polytropic Efficiency %	94.3214	

Figure 9. Compressor performance results

The relative Mach number contour at %50 span is given Figure 10. The comparison of the required parameters and the obtained parameters are given in Table 5.

Table 5. The required and the obtained parameters

Parameter	Required Value	Obtained Value
Mass Flow Rate, kg/s	$0.67 \leq \dot{m} \leq 0.69$	0.678
Total Pressure Ratio	$4.55 \leq PR \leq 4.65$	4.61
Total Isentropic Efficiency	$\eta \geq 0.87$	92.38

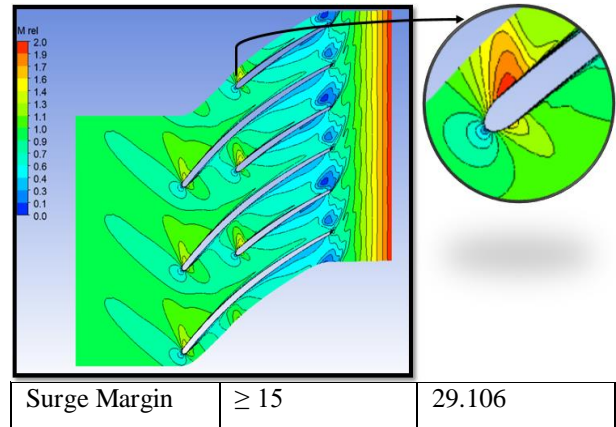


Figure 10. Relative Mach number at %50 span

The targeted mass flow rate, total pressure ratio and the rotational speed is quite high, which results in complicated flow characteristics and finally shock waves. This situation deteriorates performance and causes the rotor to operate in a narrower range [6]. It is known that blade thickness is affective on local acceleration [9], which also affects local Mach number. For this reason, especially in high-speed compressors, the leading edge is designed as thin as possible to minimize blade blockage and the effect of shock waves. The regions where the local Mach number is 1 or higher than 1, it is possible for a shock wave to develop at the leading edge [9]. As seen in Figure 10, sudden accelerations are obtained at blade leading edge. The reasons lying under this condition are the tip clearance and the high mass flow rate. These reasons result in the inlet relative Mach number to reach supersonic values which leads to shock waves [10]. As the flow goes from the leading edge towards the trailing edge, it can be seen that relative Mach number in the shroud region becomes near zero [11]. The vortex formed near the trailing edge causes the mass flow near the region to decrease and results in flow separation [12].

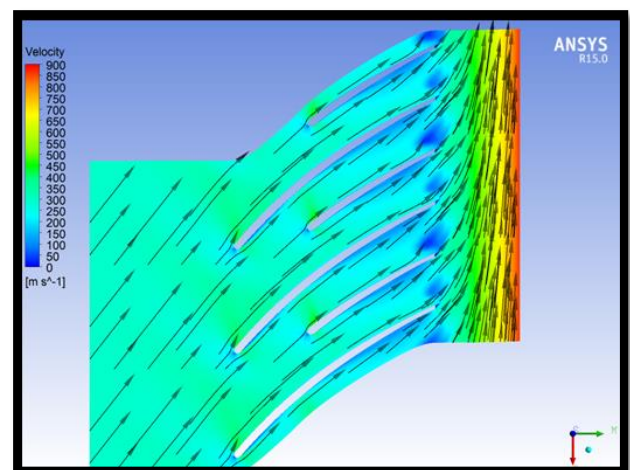
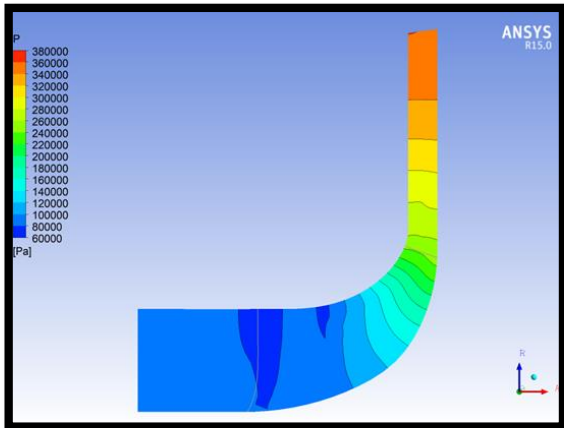


Figure 11. Velocity vectors and contour

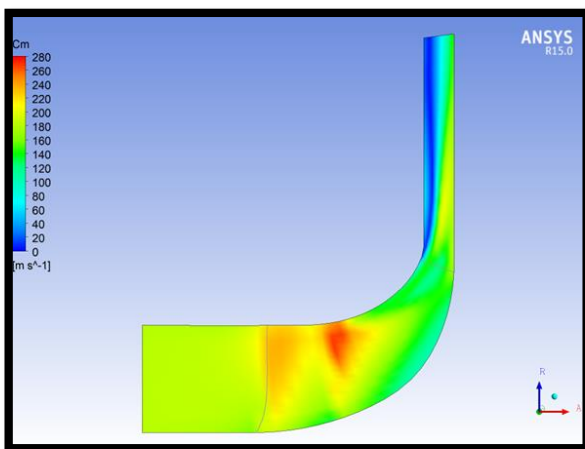


From Figure 11, one can see that the flow progresses from the leading edge toward the trailing edge without any backflow or etc. The velocity increases from the leading edge through the trailing edge, which is an expected result.



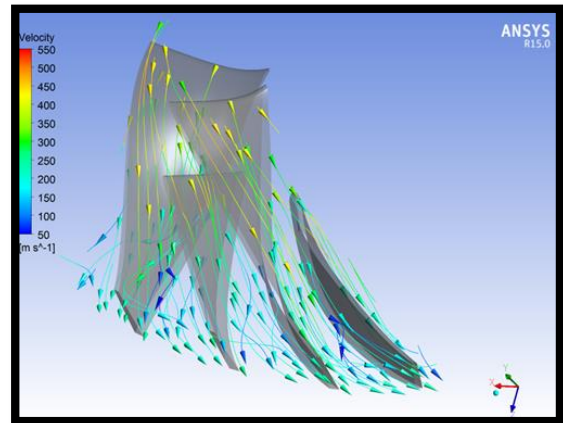
**Figure 12.** Pressure contour on meridional surface

The pressure is gradually increasing from the leading edge through the trailing edge. This is a consistent result as the operating principle of a compressor is taken into consideration.



**Figure 13.** Meridional velocity contour on meridional surface

The meridional velocity contour on the meridional surface is given in Figure 13. The meridional velocity increases from the inlet to the outlet, which is consistent with the theoretical calculations performed. The sudden decrease obtained in the tip region is a result of tip clearance flow. This undesirable result, which leads to decrement in performance, can be prevented by the selection of a proper tip clearance value [13, 14, 15]. However, this value is fixed as a requirement in this study.



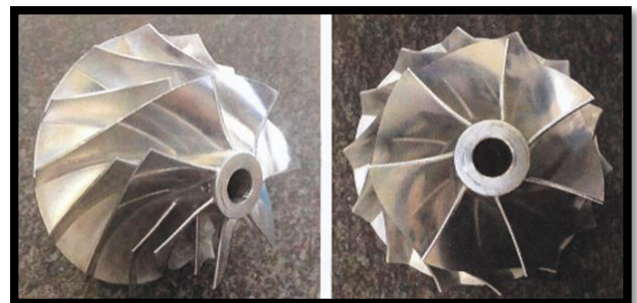
**Figure 14.** Velocity streamlines

The velocity streamlines are given in Figure 14 in a 3D view. It can be seen that the streamlines follow a proper path without any backflow.

#### 4. EXPERIMENTAL RESULTS

The designed centrifugal compressor was manufactured and tested using a turbo jet engine which is currently being used commercially. For evaluation, the results of the compressor was compared with that of the commercial engine. Due to the confidentiality agreement, the details of the test stand and test procedure cannot be presented. Also, the obtained data is normalized and is not presented for the same reason.

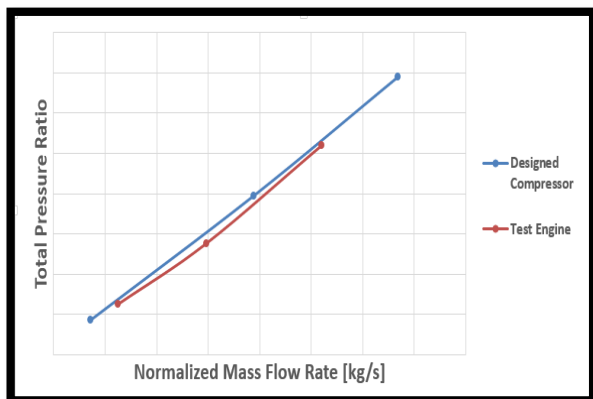
The manufactured compressor can be seen in Figure 15.



**Figure 15.** The manufactured compressor

##### 4.1. Total Pressure Ratio

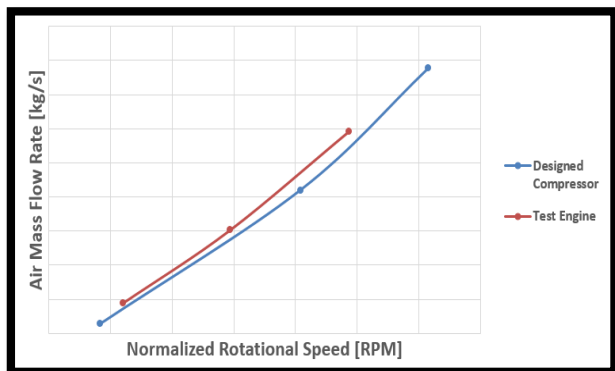
As it can be seen from Figure 16, the total pressure ratio of the designed impeller is very close to that of the test engine.



**Figure 16.** The normalized mass flow rate versus total pressure ratio

It can be seen from Figure 16 that the total pressure ratio increases with the increasing normalized mass flow rate. The normalization of the mass flow rate cannot be revealed due to confidentiality agreement. It is clear from the figure that the results of the designed compressor is quite matching with that of test engine.

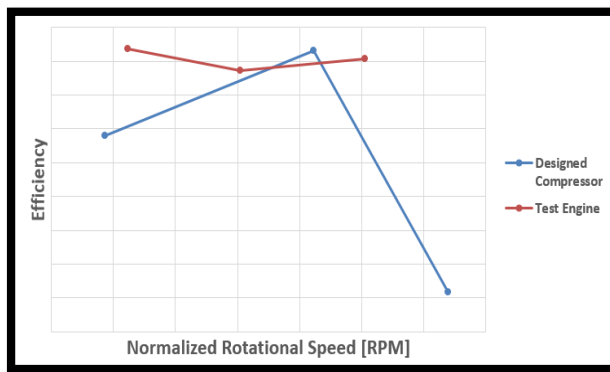
The relationship between the normalized rotational speed and the mass flow rate is given in Figure 17.



**Figure 17.** The normalized rotational speed versus mass flow rate

From Figure 17, one can see that with the increasing rotational speed, the mass flow rate of air increases correlatively. Again, it is obvious that the designed impeller gives similar results to that of the test engine.

The variation of the efficiency with respect to normalized rotational speed is given in Figure 18.



**Figure 18.** The normalized rotational speed versus efficiency

It can be seen from Figure 18 that the efficiency of the test engine varies in a narrower range with the increment in rotational speed compared to the designed impeller. However, speaking for the designed impeller, the efficiency decreases substantially in the maximum rotational speed. This situation can be stemmed from several reasons like calibration errors in the test procedure, etc.

## 5. CONCLUSION

Based on the conducted study, one can say that Computational Fluid Dynamics tools are a cheap and effective way to design a centrifugal compressor without the requirement of a test process. It was seen that the followed and described methodology for the design process gives accurate and consistent results; so, when starting a design process the authors recommend to performs the theoretical calculations initially to form a basis for the CFD analyses.

During the design process, it was obtained that even quite small variations in the blade geometry, especially blade angle distribution, blade number, etc. can cause substantial changes in the performance and flow parameters; so it is important for the designer to vary the design or geometrical parameters in such a way that the new design provides the required conditions. In conclusion, it was obtained that as the normalized mass flow rate increases total pressure ratio increases and the mass flow rate increases with the normalized rotational speed. Both the designed impeller and the test engine gives compatible results. Although the efficiency trends depending on normalized rotational speed differ from each other, the variation of efficiency values is in a small range. The difference can be arising from test/measurement/calibration errors or it can be stemmed from a main failure of the method of calculating efficiency.

**REFERENCES**

- [1] Saravanamuttoo, H.I.H., Rogers, G.F.C., Cohen, H., Straznicky, P.V., "Gas Turbine Theory", (2001).
- [2] Kulkarni, V.V., Anil, T.R., Rajan, N.K.S., "An Impeller Blade Analysis of Centrifugal Gas Compressor Using CFD", *International Journal of Innovations in Engineering and Technology*, 7(4): (2016).
- [3] Boyce, M.P., Principles of Operation and Performance Estimation of Centrifugal Compressors, (1993).
- [4] <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-a-centrifugal-compressor-and-a-screw-compressor>
- [5] Galerkin, Y., Reksrin, A., Drozdov, A., "2D and 3D Impellers of Centrifugal Compressors – Advantages, Shortcomings and Fields of Application", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 232(1): (2017).
- [6] Tamaki, H., Unno, M., Kawakubo, T., Hirata, Y., "Aerodynamic Design of Centrifugal Compressor for AT14 Turbocharger", *IHI Engineering Review*, 43(2): (2010).
- [7] Damor, J.J., Patel, D.S., Thakkar, K.H., Brahmabhatt, P.K., "Experimental and CFD Analysis of Centrifugal Pump Impeller – A Case Study", *International Journal of Engineering Research and Technology*, (2013).
- [8] ANSYS CFX 15.0 User's Guide, ANSYS Inc., (2013).
- [9] Japikse, D., "Centrifugal Compressor Design and Performance", Wilder VT, USA: Concepts ETI, (1996).
- [10] Pakle, S., Jiang, K., "Design of a high-performance centrifugal compressor with new surge margin improvement technique for high speed turbomachinery", *Propulsion and Power Research*, 7(1): (2018).
- [11] He, X., Zheng, X., "Mechanisms of Sweep on the Performance of Transonic Centrifugal Compressor Impellers", *Applied Sciences*, 7(10): 1081, 2017.
- [12] Bogdanets, S., Blinov, V., Sedunin, V., Komarov, O., Skorohodov, A., "Validation of a CFD Model of a Single Stage Centrifugal Compressor by Local Flow Parameters", *EPJ Web of Conferences; Les Ulis EDP Sciences*, 196: (2019).
- [13] Zahed, A. H., Bayomi, N. N., "Design Procedure of Centrifugal Compressors", *ISESCO Journal of Science and Technology*, 10(17): (2014).
- [14] Casey, M. V., Krahenbühl, D., Zwysig, C., "The Design of Ultra-High-Speed Miniature Centrifugal Compressors", *European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics ETC*, 10: (2013).
- [15] Li, P. Y., Gu, C. W., Song, Y., "A New Optimization Method for Centrifugal Compressors Based on 1D Calculations and Analyses", *Energies*, 8(5): 4317-4334, 2015.



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Yüksek sıcaklık fırınlarının hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile modellenmesi

## *Computational fluid dynamics modeling of high temperature furnaces*

Yazarlar (Authors): Cuma KILINÇ<sup>1</sup>, Ümit İSKENDER<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-6258-617X

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-8604-882X

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Kılınç C., İskender Ü., “Yüksek sıcaklık fırınlarının hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile modellenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 241-247, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.656066

# Yüksek Sıcaklık Fırınlarının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Modellenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Cuma KILINÇ\*, Ümit İSKENDER**

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Beşevler, Ankara

(Geliş/Received : 18.05.2019 ; Kabul/Accepted : 06.09.2019)

## ÖZ

Yüksek sıcaklık pişirme fırınlarındaki sıcaklık dağılımı, ürünün çatlaması, kırılması ve hatalı olarak atıl duruma düşmesinde en önemli kriterdir. Pişirme süresince sıcaklık dağılımının homojen olarak fırın içerisindeki dağılımında brülörlerin konumu, debisi, alev boyu gibi pek çok parametre etkilidir. Bu parametrelere göre seramik pişirme fırınlarındaki sıcaklık dağılımının sayısal analizi hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile yapılmıştır. Bu çalışma ile sıcaklık dağılımı ve fırın içerisindeki hava akış hızlarının dağılımı FLUENT 6.2.16 kullanılarak sayısal modelleme çalışması yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji, HAD, fırın.

## Computational Fluid Dynamics Modeling of High Temperature Furnaces

### ABSTRACT

Temperature distribution in high-temperature cooking ovens is the most important criterion for cracking, breaking and erroneous inertization of the product. Many parameters such as the position, flow rate, flame length of the burners are effective in the homogeneous distribution of temperature distribution in the oven during cooking. According to these parameters, numerical analysis of temperature distribution in ceramic cooking ovens was made by computational fluid dynamics. In this study, the numerical modeling study was carried out using FLUENT 6.2.16.

**Keywords:** Energy, CFD, furnace.

### 1.GİRİŞ

Seramik, şekillendirilmiş çamurun kurutulup pişirilmesi ve sırlanması ile ortaya çıkan üründür. Çalışma şekillerine, yakıt türlerine ve ürün pişirme kapasitelerine göre çeşitli seramik pişirme fırınları tasarlanmıştır. Seramik pişirme işleminde ürün kalitesi kullanılan malzemeye ve pişirilen fırına paralel olarak değişmektedir.

Seramik, ürünlerin kurutulduktan sonra, pişirilmesi, sırlanarak kimyasal maddelere ve suya karşı dayanıklı bir yapı oluşturmaları için 800 ile 2000 ° C arasında en az bir kez pişirilirler. Eğer sırlama yapılacaksa pişirme işlemi çeşitli sıcaklık aralıklarında tekrar edilir. Seramiğin pişirilmesinin yanı sıra soğutulması da belirli kriterlere göre yapılmaktadır.

Yanma odaları hakkında geçmişten günümüze kadar hem kuramsal, hem de deneysel olarak birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, yanma veriminin artırılmasının yanında, yanma süresinin kısaltılmasını, yanma sonucu ortaya çıkan istenmeyen gazların oluşmasını engellemek ve yanma odasının küçük hacimde seçilmesini sağlamak üzerine yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda karşılaşılan sorunlar nedeniyle,

yanma odaları hakkında yapılan çalışmalar kuramsal olarak gerçekleştirilmektedir.

İşyarlar (İşyarlar, 2007), yanma odası içinde gerçekleşen termodinamik hal büyüklüklerini incelemiştir. Bu çalışmada çeşitli parametreler ele alınarak, bu parametrelerin değişimlerinin sonucu olarak, yanma odası içerisindeki sıcaklık, entalpi, entropi değerleri incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar daha önceden yapılmış çalışmalarla karşılaştırılmış ve yanma olayını etkileyebilecek bu parametrelerin analizi yapılmıştır.

Özen (Özen, 2009), iki boyutlu bir brülörde yanma olayının daha iyi anlaşılabilmesi için yanmanın olduğu (reaksiyon) ve yanmanın olmadığı (izotermal) durum problemlerini sayısal olarak incelemiştir. Bu çalışmada, iki ayrı problem, çözüm ağırları GAMBİT 2.2.30 programında tasarlandıktan sonra sonlu hacimler metodunu kullanan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) paket programlarından FLUENT 6.2.16 kullanılarak çözülmüştür. HAD analizlerinin temelleri üzerinde durulmuş ve kullanılan sayısal çözüm yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlara göre hız ve sıcaklık incelemeleri yapılmıştır. Değişik alev parametreleri için hız büyüklüklerinin, türbülans kinetik enerjisinin, boyutsuz parametreler ile değişimleri incelenmiştir

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : cuma.kilinc@hotmail.com

Bakrozis ve arkadaşları (Bakrozis, 1999), girdap akımlı bölgeye iki boyutlu silindirik nozuldan yakıt enjekte edilerek elde edilen türbülanslı reaktif akışı deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı hava-yakıt oranlarına sahip üç alev için yapılan incelemede alev uzunluğunun hava-yakıt oranı düştükçe azaldığı gözlenmiştir. Sıcaklık genel olarak nozulün tam orta noktasında maksimum değere ulaşırken duvarlara yaklaştıkça düşmektedir. Hızların, nozul simetri ekseninde sıcaklığın tam tersine minimum değerine ulaştığı, duvara yakın bölgelerde ise en yüksek değerlerde olduğu bulunmuştur.

Başaraner yaptığı çalışmada (Başaraner, 1995), iki boyutlu, sürekli rejimde, reaktif ve türbülanslı akış içeren bir yanma odası geliştirmiştir. Çalışmasındaki parametreleri değiştirerek, farklı sonuçlar elde etmiştir. Modelin sonuçlarını daha önce yapılmış olan çalışmalarla karşılaştırmış, ardından yanma olayını etkileyebilecek çeşitli parametrelerin çözümlemesini yapmıştır

Bu çalışmada pişirme fırınlarındaki sıcaklık dağılımları incelenerek homojen sıcaklık dağılımının elde edilmesinin kriterleri belirlenmiştir.

### 3.SERAMİK

Bir yada daha fazla metalin metal olmayan bir element ile birleşerek sinterlenmesi yani bu elementlerin yüksek sıcaklıkta bir araya getirilmesiyle oluşan inorganik bileşiğe seramik denir. Halk arasında pişmiş toprak olarak bilinir.

Seramik toprak esaslı olup dış etkiler sonucu parçalanmış kayalardan oluşan kil, kaolen ve bunun gibi maddelerin yüksek sıcaklıkta fırınlarda pişirilmesiyle oluşur.

Seramik çamurunda kullanılan hammaddelerin işlevleri kısaca şöyledir.

Ana hammaddeler:

**Kaolin :** Seramik sağlık gereçleri çamurunda % 25- 30 seramik kaplama malzemelerinde (duvarda) % 15 -20 oranında kullanılır. Çamurun beyazlığı ve pişirmede iskelet oluşumu sağlar.

**Kil :** Seramik sağlık gereçleri çamurunda %30-35 seramik kaplama malzemelerinde (yer ve duvar) %30-55 oranında kullanılır. Çamurun çığ halde plastiği ve kuru mukavemeti verir.

**Feldspat :** Seramik sağlık gereçleri çamurunda %20-25 seramik kaplama malzemelerinde (yer ve duvarda) %20-45 oranında kullanılır. Çamurun pişme esnasında ergimesi, camsı faza geçmesini sağlar.

**Kuvars –kuvars kumu :**Seramik sağlık gereçleri çamurunda %10–15 seramik kaplama malzemelerinde (duvarda) %5-15 oranında kullanılır. Pişmiş çamurunda iskelet teşekkülünü sağlar.

**Mermer :** Küçük kristalli ve basınç altında sağlamlaşmış kalsiyum karbonattır. Seramikte kullanılacak mermerde Fe ve renk verici maddelerin bulunmaması gerekir. Mermer saf feldspat ile ısıtılacak olursa, feldspatın 1280 °C olan ergime noktasını düşürerek daha kolay eriyen bir

cam meydana getirir. Bu özelliğinden dolayı sır üretiminde kullanılır.

**Wollastonit :** Bileşimi kalsiyum silikattır. (CaOSiO<sub>2</sub>) elyafı bir yapısı vardır. Teknik birleşimi %48.25 CaO, % 51.75 SiO<sub>2</sub> olup sertliği 4.5–5 mohs dolayındadır.

**Magnezit :**MgCO<sub>3</sub> bileşiminde olup tabiatta bol miktarda bulunur tek başına ısıtıldığında refrakter sanayinde erime noktasının yüksekliği ve cürufa dayanıklılık yönünden çok önemli bir hammaddedir. Diğer maddelerle karıştırıldığında erikten vazifesi görür. Kuvars ile ısıtılırsa magnezyum silikatu meydana getirir.

### 4. SERAMİK FIRINLARI

İçerisine yerleştirilen ya da sürekli olarak yüklenen malzemeleri, ekonomik bir şekilde ısıtmak suretiyle, işlem sıcaklığına yükselten ve bu sıcaklıkta gereken süre kadar tutan teknik ünitelere, fırın ya da ocak denir. Fırın hacmi, ısıtılacak maddeleri içine alacak ve ısıyı ekonomik olarak üretecek tarzda düzenlenmiştir. Genel olarak, 300 °C dereceye kadar ısınan tiplerine ocak, daha yüksek sıcaklıkta olanlara ise fırın denilmektedir. Isıtılacak parçalar ya da yapı malzemeleri ile alev ve baca gazlarından oluşan fırın atmosferi arasında, genellikle istenmeyen birçok kimyasal olay meydana gelir. Sıcaklığa da bağımlı olan bu olayların, fırın tipinin seçiminde ve yapımında göz önünde tutulması gerekir.

Fırınların genel kullanım alanları şöyle sıralanabilir;

1. Demir ve diğer metal ve alaşımların ergitme ve rafinasyon fırınları
2. Metallerin sıcak şekillendirilmesi için ısıtma fırınları
3. Metallerin ısı işlemleri için kullanılan fırınlar
4. Cevher hazırlama ve zenginleştirme fırınları
5. Seramik, çimento, tuğla vb. üretiminde kullanılan fırınlar
6. Cam endüstrisinde kullanılan fırınlar
7. Kimyasal tesislerde ve plastik üretiminde kullanılan fırınlar
8. Laboratuvar fırınları
9. Kâğıt, tekstil ve diğer endüstri dallarında kullanılan fırınlar

#### 4.1.Seramiğin Pişirilmesi ve Soğutulması

Seramikler, anorganik malzemelerin şekillendirilerek fırınlarda ısı yoluyla sertleştirilmesi ile elde edilen malzemelerdir. Seramik hangi cins olursa olsun seramik teknolojisinde bir pişirme işlemi zorunludur. Pişirme işlemi seramik mamullerinin üretiminde en önemli kademelerden biri olmaktadır. Fırınlama işlemi işletme verimini önemli derecede etkilemekte olup ürünlerin bozuk çıkması ile daha önceki işlemlere ait, enerji malzeme ve masraflar heba olmaktadır. Pişirmenin amacı;

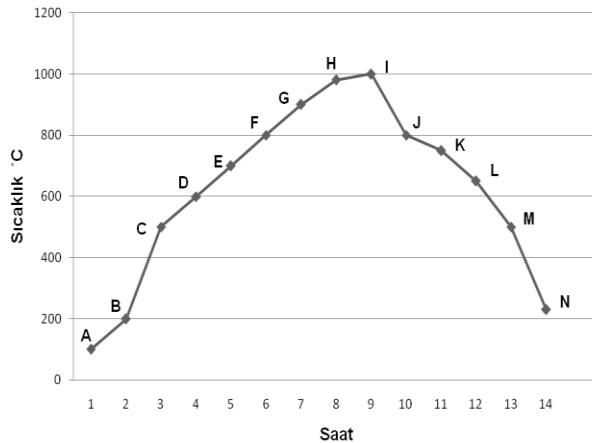
1. Uygun bir pişirme sıcaklığı,
2. Uygun bir ısı dağılımı ve sıcaklık değişim hızı,

3. Uygun bir alev kalitesi, temin etmek sureti ile arzu edilen kalite ve miktarda ürün elde edebilmektir

Seramik mamullerin fırında pişirmeye girdiğinde sert, suya ve kimyasal maddelere dayanıklı bir ürün elde edilir. Sırlanmamış ürüne bisküvi denir ve bir defa pişirilir. Sırlı seramik ise genelde iki defa pişirilir. İlk pişirmeye bisküvi pişirimi denir. Bisküvi mamul sonra sırlanır ve sırlın olgunlaşması için sırlama fırına girer. Dekor seramikler dekor sonrası 700-800 °C'de pişirmeye girer.

Şekillendirilmiş seramik çamurları suya ve kimyasal maddelere dayanıklı, kararlı bünyelere dönüştürülebilmeleri için bileşimine ve niteliklerine göre 700- 2000 °C arasında en az bir kere pişirilirler. Bu aşamadan sonra sırlanacaksa sırlın gelişmesi için 2. kez, sırl üstü dekorlanacaksa boyaların cinsine ve olgunlaşma derecelerine göre 3. ve 4. kez de pişirilebilirler.

Seramik üretiminde pişirme önemli bir süreç olup, iyi ürün elde edebilmek için pişirme hızı denetlenmeli, fırında uygun bir sıcaklık dağılımı olmalı, pişirme süresi iyi seçilmeli ve soğutma denetim altında tutulmalıdır. Şekil 1'deki pişirme grafiği pişirmenin önemi hakkında bilgi verebilir.



Şekil 1. Seramik Pişirme Sıcaklık- Zaman Grafiği (Ceramic Cooking Temperature- Time Graph)

Pişirme modları:

- AB - Ürünün Kuruması
- BC - Kimyasal suyun uzaklaşmaya başlaması
- CDE - Kuvarın alfa-beta değişimi ve kimyasal suyun tamamen uzaklaşması için yavaş pişirilir
- EFG - Bileşimin mineralleri öz yapılarını değiştirir.
- GHI - İskeleti oluşturan kristal yapı oluşur.
- I - Homojen ısı dağılımı için bir süre tutulur.
- Soğutma
- IJ - Hızlı olabilir.
- JK- Kuvars dönüşümünden dolayı soğuma çok yavaş olmalıdır
- MN - Kuvars dönüşümünden dolayı yavaş soğutulmalıdır.
- LM - Hızlı soğutulabilir

## 4.2. Pişme Süresini Belirleyen Etkenler

- Bünye cinsi
- Fırınları doldurma sıklığı
- Malzemenin kalınlığı
- Sıcaklığın fırının ortasını etkileme süresi ( Isı homojenliği )
- Fırının hacmi

En ilkelden en gelişmişine kadar, seramik fırınlarında sıcaklık kontrolü ve ölçme işlemi, fırının ayrılmaz bir parçası olmuştur. Fırın türü nasıl olursa olsun, fırının yanmasını kontrol eden ve sıcaklığı ölçen sistemler kullanılır. Çoğu zaman iyi bir sıcaklık kontrolü için, çeşitli türdeki araçlar aynı fırında bir arada kullanılır. Seramik fırınlarında pişirilecek olan malzemenin en iyi şekilde pişmesi ve teknolojinin gerektirdiği özellikleri kazanması ancak fırın sıcaklık kontrolünün düzenli yapılması ve sıcaklığın belirli bir düzeyde tutulması ile olur. Çizelge 1. Seramik ürünlerin pişirme sıcaklık değeri ve ısı ihtiyacı hakkında bir bilgi vermektedir.

## 5. SAYISAL ÇÖZÜMLEME

Şekil 2'den yanma ürünleri sıcaklığının doğrusal bir değişim göstermediği ancak pişirme süresince sürekli yükseldiği görülmektedir. Bununla beraber, fırında tüketilen doğal gaz miktarının ise fırın sıcaklığı ile doğru orantılı olarak değişmediği görülmektedir. Doğal gaz tüketiminin değişkenlik göstermesi, yanma ürünlerinin de aynı oranda değişiklik göstermesine sebep olmaktadır. Bu sonuçlar, fırındaki kurutma süresince gaz tüketimi ve yanma ürünü verilerinin değişken olduğunu, yapılacak hesaplama ve tasarımların ortalama bir değer üzerinden yapılmasını gerekli kılmıştır.

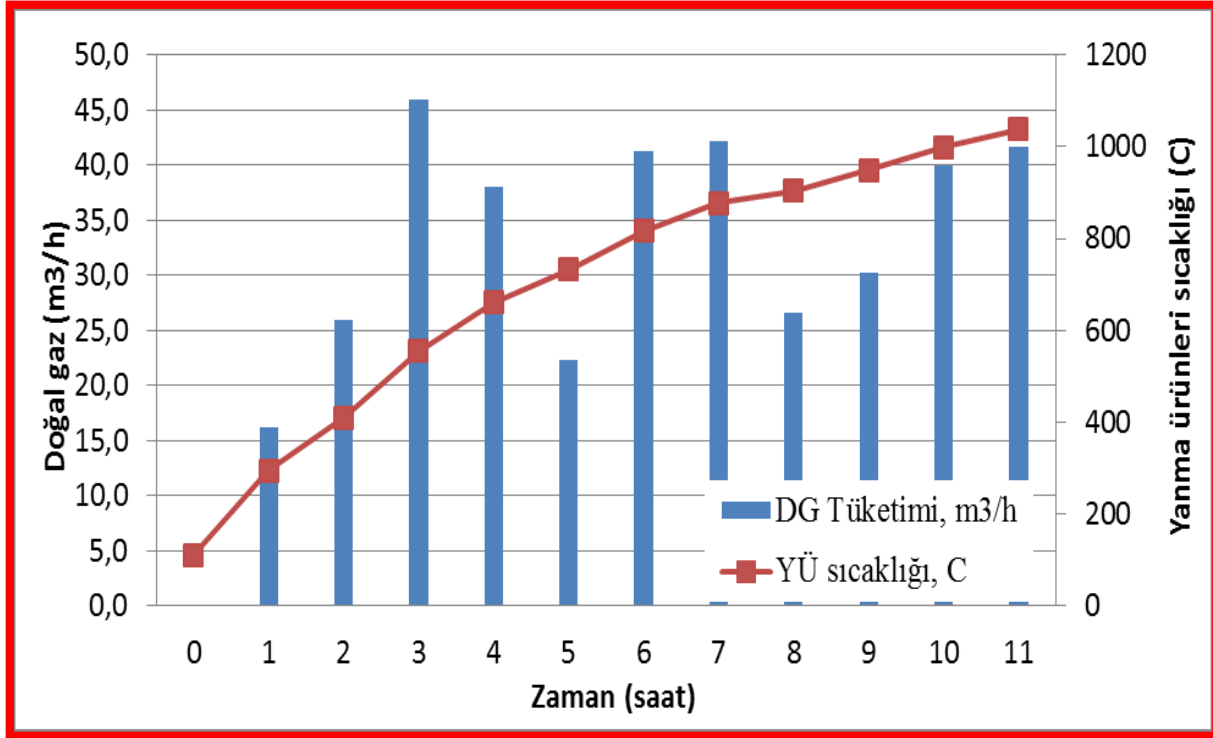
Çizelge 1. Seramik Ürünlerinin Pişirme Sıcaklığı Süresi Isı İhtiyacı (Ceramic Products Cooking Temperature Time Heat Requirement)

MALZAMA CİNSİ	PİŞİRME SICAKLIĞI ( °C)	PİŞİRME SÜRESİ h (saat)	ISI İHTİYACI kJ/kg Brüt miktar
Tuğla	1100	65-70	840-1250
Kiremit	1280	90-120	1880-2100
Sihhi tesisat malzeme	1300	60-70	8370-11720
Fayans	1080	30-40	7120-7540
Emaya kaplama	1280	30-40	8380-10050
Şamot tuğla	1400	65-80	1880-2720
Silika tuğla	1550	200-225	6700-7120
Yüksek değerli porselen	1450	35-50	24300-24700
Elektro porselen	1450	50-100	17170-17500

Seramik pişirme fırınından ölçülen deneysel veriler kullanılarak sayısal çözümleme analizleri yapılmıştır. Ölçümler fırının normal çalışma prosedürü çerçevesinde yapılan gerçek ve tam yükleme şartlarında yapılmıştır. Ölçümler, fırın üst noktasında yanma ürünleri çıkış ağzında, baca klapesinin hemen altında gerçekleştirilmiştir. Bu noktada yapılan ölçümler yanma ürünlerinin gerek debi, gerekse sıcaklık bakımından en doğru sonuçların alınmasını sağlamıştır.

7 – 10 arası sıcaklıkta ise fırın sıcaklığını artırmak ve mevcut sıcaklığı azaltmamak için doğal gaz az verilip artarak sıcaklık değeri yavaş artmaktadır. seramiğin İskeleti oluşturan kristal yapı oluşur.ve fırın istenilen sıcaklığa ulaşır .

10- 11 saatleri arasında fırında istenilen sıcaklık sağlanmış olup fırın bir miktar homojen ısı dağılımı için bir süre tutulur.



Şekil 2. Seramik Fırınının Doğal Gaz Tüketimi Ve Sıcaklık Değişimi ( Natural Gas Consumption and Temperature Change of Ceramic Furnace)

Bu ölçümler sonucunda pişirme süresindeki fırın sıcaklığının sürekli arttığı görülmektedir burada sıcaklık değerleri sürekli artarken harcanan doğal gaz oranı değişimi orantılı değildir . Seramiğin zarar görmemesi belli zaman aralıklarında belli sıcaklık değerinde olması için ve sıcaklığın seramiğin üzerinde homojen dağılması için fırındaki yanma hızları ve doğal gaz tüketim miktarı belli aralıklarda değişmektedir.

1- 3 saatleri arasında fırının sıcaklığın 1000 dereceye getirilmesi durumunda sıcaklığın artışı ile doğal gaz harcanmıştır ve sıcaklığı hızlı artırarak bu evrede seramik kimyasal suyunu uzaklaşmaya başlaması evresindedir.

3 – 5 saatleri arasında gaz kullanımı azalarak fırının ısınını korumasıyla da fırın yavaş çalışır çünkü bu evrede seramik içerisindeki kuvarsın alfa-beta değişimi ve kimyasal suyun tamamen uzaklaşması için seramik yavaş pişirilir.

5 – 7 saatleri arasında doğal gaz artışıyla seramiğin bileşimin mineralleri öz yapılarını değiştirdiği evredir ve sıcaklığın fazla olması gerekir fırın hızlı çalışır doğal gaz yakımı artar.

Yapılan FLUENT ön hazırlık analizlerine göre fırın için mevcut sistemin ölçüleri ve beklerin yerleri kullanılarak fırın içi hız ve sıcaklık dağılımları ile davlumbaz içi sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Fırın boş ve yüklemeli olarak ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Özellikle çift bacalı ve 3 bacalı fırınlarda bacalardan atılan ısının davlumbaz içerisindeki yayılımı ile dolu haldeki fırın içi sıcaklık dağılımının homojenliği tespit edilerek ürün kalitesinin bozulmaması için optimum bek alev sıcaklıklarının belirlenmesine ve beklerin mevcut sistemdeki yerlerinin homojen şekilde dağılımını sağlayacak düzenlemenin yapılabilmesine imkan tanınacaktır.

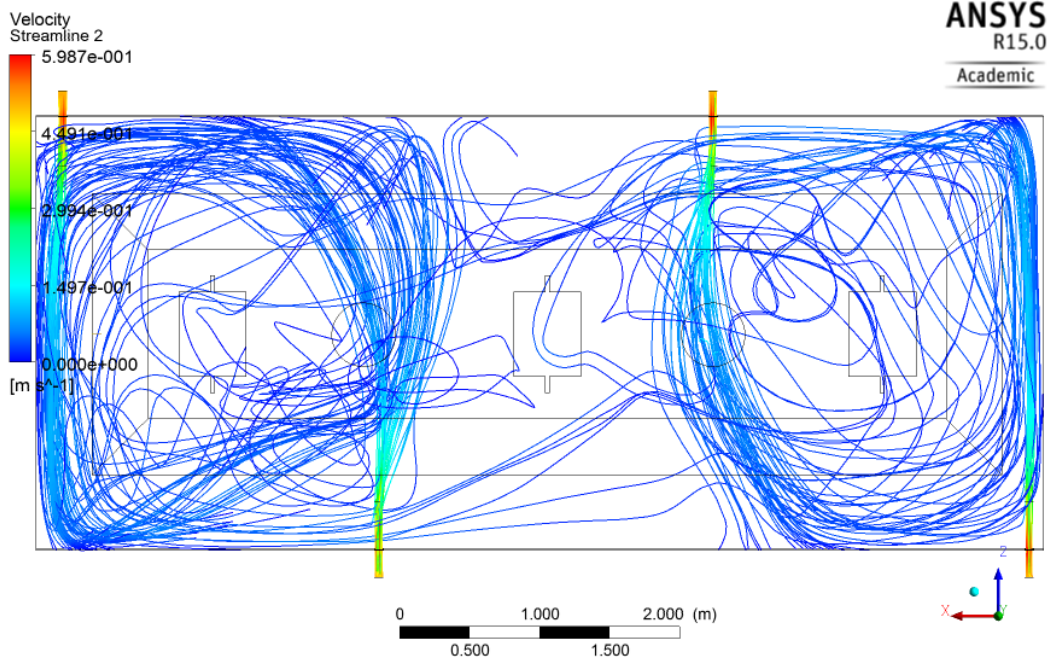
Şekil 3’de kazanın üstten görünüşü verilmektedir. Fırın içerisinde her iki kenarlara brülör yerleştirilmiş ve ortada baca çekişi görülmektedir. Aynı seviyeye yerleştirilmiş brülörler türbülansı sağlamak için karşılıklı taraflara yerleştirilmiş olup bu şekilde yanmanın daha verimli olması ve sıcaklık dağılımının homojen olmasını sağlar.

Şekil 4’de görüldüğü gibi tane alt alta dizilmiş şekilde toplam 16 tane brülör yerleştirilmiştir.

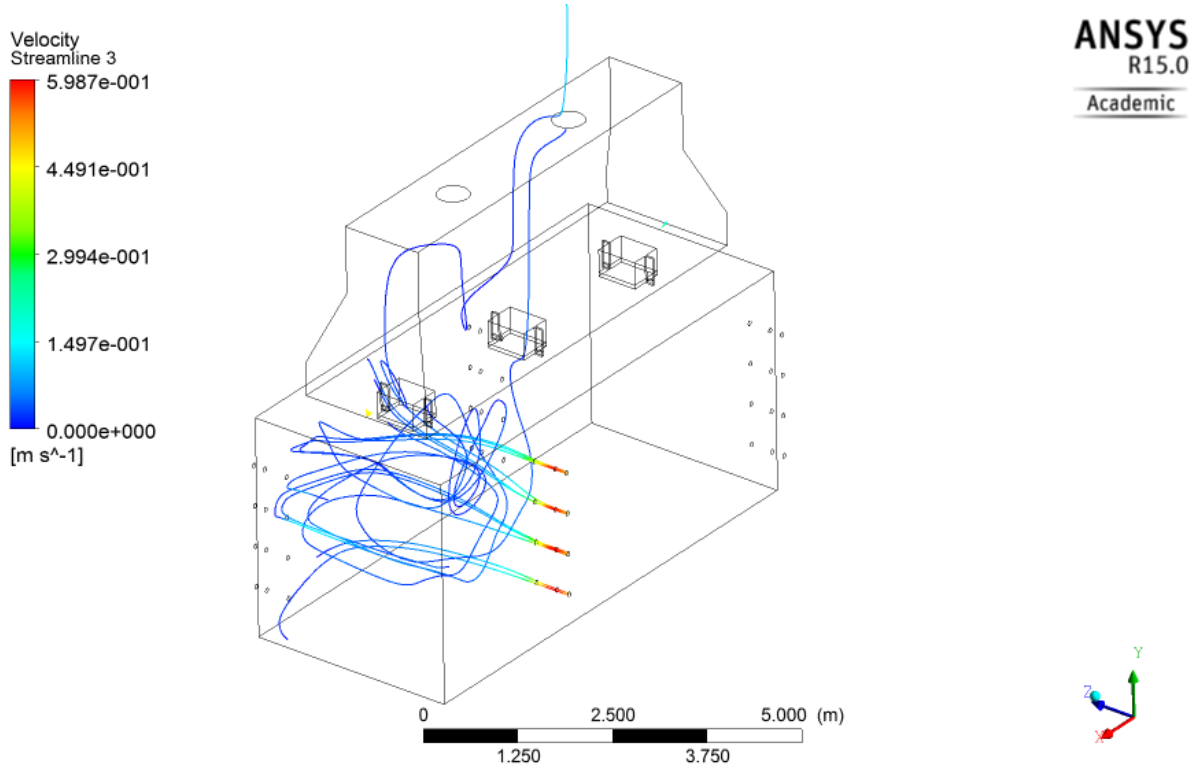


Fırın boş ürün olmadan çalışmakta ve bu fırının yanmasının ilk evreleridir burada brülörlerin yerleştirilmesinin önemi ve akışın türbülanslı olduğunu

baca çekişlerini ve sıcaklığın en fazla 470°C olduğu görülmektedir. Fırın daha homojen ısı dağılımına sahip değildir.



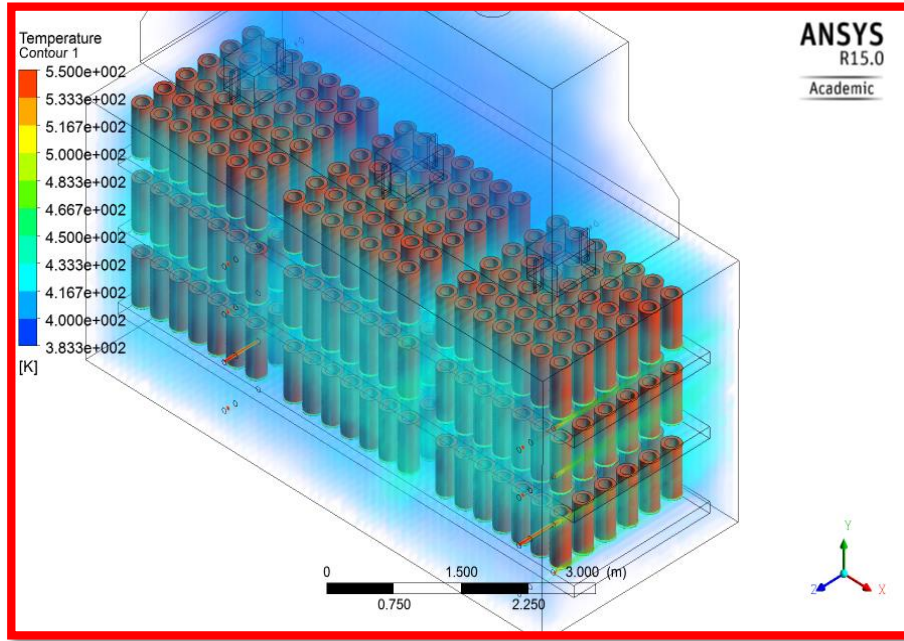
**Şekil 3.** Fırının Üsten Brülör Görünümü ve Türbülanslı Akış  
(Top of the Furnace Burner View and Turbulent Flow)



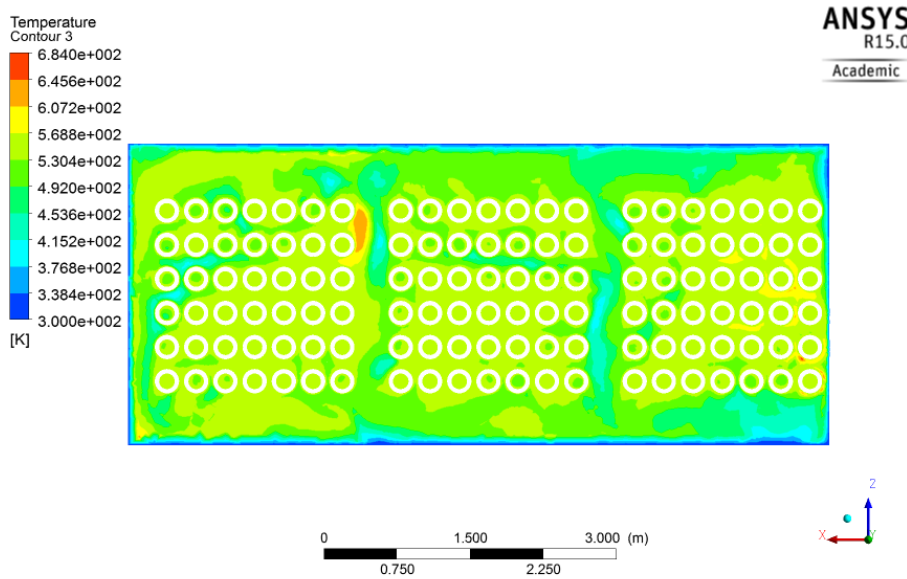
**Şekil 4.** Fırındaki brülörlerin görünümü (View of burners in the furnace)

Piştirilecek ürünler yerleştirildikten sonra yapılan analizlerde elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 5-7'de verilmiştir. Fırın içerisindeki sıcaklık dağılımı brülör noktaları hariç homojene yakındır. Ayrıca üstten görünümü de Şekil 6'da verilmiştir. Burada sıcaklık giderek artmakta ve sıcaklık dağılımı yavaş yavaş homojen olmakta ve sıcaklık maksimum  $550^{\circ}\text{C}$  ye ulaşmaktadır. Burada seramiklerle birlikte ilk sıcaklığın homojen dağıldığını görmekteyiz. Hız vektörleri brülör girişlerinden etkilenecek fırın içerisindeki sıcak hava akımına yön vermiş ve dağılımı üç ana bölgede homojen yapıya ulaştırmıştır. En üst brülörlerle sıcak hava

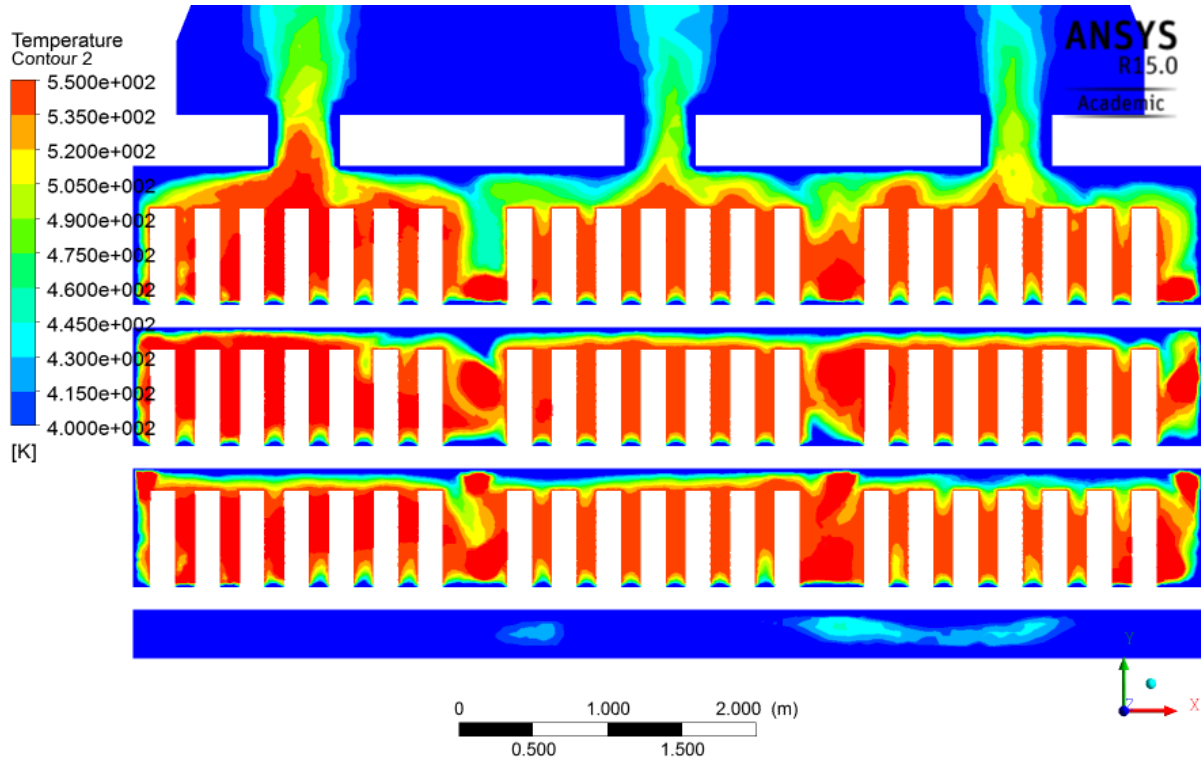
akımının bacaya doğru yönelmesini sağlamış ve fırın içi sıcaklığın zayıflamasına neden olmuştur. Piştirilen ürün bazında incelemeler yapıldığında hız vektörlerinin etkisinde bazı ürünler etrafında sıcaklık dağılımının homojenlikten uzak olduğu da üst görünüşten (Şekil 6) anlaşılmaktadır. Yan görünüşten (Şekil 7) ürün üzerindeki etkiler ön yüz kısmında net anlaşılamamakta olup ürün geçişlerinin homojen yapıya ulaşmasında brülör yerleşiminin ve alev boyunun doğru ayarlanmasına bağlı olarak fırın içi sıcaklığın homojen yapıya ulaşabileceği de görülmektedir.



Şekil 5. Fırın seramik pişiriminde homojen sıcaklık termal perspektif görünümü  
(Thermal perspective view of homogeneous temperature in kiln ceramic firing)



Şekil 6. Fırın seramik pişiriminde üstten görünüş  
(Top view of furnace ceramic firing)



Şekil 7. Fırın seramik pişiriminde homojen sıcaklık ön görünümü  
(Homogeneous temperature pre-view in kiln ceramic firing)

#### KAYNAKLAR

- 1) Bakrozis, A.G., Papailiou, D.D., Koutmos, P., "A study of the turbulent structure of a two-dimensional diffusion flame formed behind a slender bluff-body", *Combustion and Flame* 119, 291-306 (1999).
- 2) Başaraner, S., "Doğal gaz yakıtlı kazanlarda yanma odasının matematiksel modellenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-124 (1995).
- 3) <https://docs.google.com/presentation/d/1nFkwkiLPsPUd2qzZ4u70E6zufZFJXwWft6wbtoWzvdY/edit#slide=id.i0>
- 4) <http://cengizdamar.blogcu.com/seramik-camuru-ve-yapimi/6254877>
- 5) <http://www.megep.meb.gov.tr/dokumanlar>
- 6) İşyarlar, B., "Doğal gaz yakıtlı bir yanma odasında termodinamik hal büyüklüklerinin analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 17-23 (2007).
- 7) Özen, E., "iki boyutlu bir brülördeki yanmanın hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-10 (2009).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Titanyum dioksit/indirgenmiş grafen oksit kompozitlerin üretimi ve fotokatalitik özelliklerinin incelenmesi

## *Production of titanium dioxide/reduced graphene oxide composites and investigation of their photocatalytic properties*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Metin YURDDAŞKAL<sup>1</sup>, Uğur KARTAL<sup>2</sup>, Eyyüp Can DOLUEL<sup>3</sup>

*ORCID*<sup>1</sup>: 0000-0001-7293-1216

*ORCID*<sup>2</sup>: 0000-0002-5557-2300

*ORCID*<sup>3</sup>: 0000-0002-7018-0743

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Yurddaşkal M., Kartal U. ve Doluel E. C., "Titanyum dioksit/indirgenmiş grafen oksit kompozitlerin üretimi ve fotokatalitik özelliklerinin incelenmesi", *Politeknik Dergisi*, 23(1): 249-255, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.537900

# Titanyum Dioksit/İndirgenmiş Grafen Oksit Kompozitlerin Üretimi ve Fotokatalitik Özelliklerinin İncelenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Metin YURDDAŞKAL<sup>1,2\*</sup>, Uğur KARTAL<sup>3</sup>, Eyyüp Can DOLUEL<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Elektronik Malzemeler Üretim ve Uygulama Merkezi (EMUM), Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 10.03.2019 ; Kabul/Accepted : 27.03.2019)

## ÖZ

Bu çalışmada, titanyum dioksit/indirgenmiş grafen oksit (TiO<sub>2</sub>/rGO) kompozitleri sol-jel yöntemi kullanılarak sentezlenmiştir. Hummers metodu ile üretilen grafen oksitten (GO) kimyasal indirgeme yardımıyla rGO elde edilmiştir. TiO<sub>2</sub>/rGO kompozitleri ağırlıkça % 0,5, 1, 2, 4, 6 oranlarında rGO içerecek şekilde üretilmiş olup rGO katkısının yapısal, morfolojik ve fotokatalitik özellikler üzerine etkisi araştırılmıştır. Buna ek olarak TiO<sub>2</sub>/rGO kompozitleri ile karşılaştırma yapabilmek için saf TiO<sub>2</sub>'de üretilmiştir. TiO<sub>2</sub>/rGO kompozitlerinin kristal faz yapısı, yüzey morfolojisi ve kimyasal bağ yapısı XRD, SEM ve FTIR kullanılarak karakterize edilmiştir. Fotokatalitik performansın belirlenmesi için UV-Vis spektroskopisi kullanılarak absorpsiyon değerleri elde edilmiştir. Fotokatalitik özelliklerinin incelenmesi sonucunda ağırlıkça % 4 rGO içeren kompozitin % 87,1'lik bir fotokatalitik parçalamaya sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışma, TiO<sub>2</sub>'ye ağırlıkça % 4'lük rGO eklenmesiyle elde edilen TiO<sub>2</sub>/rGO kompozitinin fotokatalitik performansı saf TiO<sub>2</sub>'ye kıyasla % 20 artırdığını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Titanyum dioksit, indirgenmiş grafen oksit, fotokataliz, kompozit, sol-jel.

## Production of Titanium Dioxide/Reduced Graphene Oxide Composites and Investigation of Their Photocatalytic Properties

### ABSTRACT

In this study, titanium dioxide/reduced graphene oxide (TiO<sub>2</sub>/rGO) composites were synthesized by sol-gel method. Reduced graphene oxide was obtained with the aid of chemical reduction of graphene oxide (GO) produced by the Hummers method. TiO<sub>2</sub>/rGO composites were produced with different rGO content, 0.5, 1, 2, 4 and 6 wt. %, to investigate the effect of rGO addition on structural, morphological and photocatalytic properties. In addition, the pure TiO<sub>2</sub> was also produced for comparison with all TiO<sub>2</sub>/rGO composites. The crystal phase structure, surface morphology, and chemical bond structure of TiO<sub>2</sub>/rGO composites were characterized using an XRD, SEM, and FTIR. Absorbance values were obtained by UV-Vis spectroscopy to determine the photocatalytic performance. As a result of the investigation of photocatalytic properties, it was observed that the composite containing 4 wt. % of rGO has a photocatalytic degradation efficiency of 87.1%. This study demonstrated that the TiO<sub>2</sub>/rGO composite obtained by the addition of 4 wt. % of rGO to TiO<sub>2</sub> enhanced the photocatalytic performance by 20% compared to pure TiO<sub>2</sub>.

**Keywords:** Titanium dioxide, reduced graphene oxide, photocatalysis, composite, sol-gel.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektro-optik özellikleri sebebiyle yenilenebilir enerji ve fotokatalitik uygulamalarda son zamanlarda sıklıkla kullanılır hale gelen TiO<sub>2</sub>, yarıiletken malzemeler arasında ön plana çıkmaktadır [1–4]. TiO<sub>2</sub>, üstün fotokatalitik özellikleri sayesinde atık sularındaki organik kirliliklerin giderilmesinde de kullanılmaktadır. Fakat TiO<sub>2</sub>'nin nispeten geniş bant aralığına (3,0-3,2 eV) sahip olması ve ışıkla uyarıldığında elektron boşluk çiftlerinin hızlı yeniden birleşmesi sonucu görünür ışığı sınırlı seviyede soğurmaktadır [1,5–8]. Literatürde TiO<sub>2</sub>'nin

bant aralığının daraltılması için başka bir yarıiletken ile kompozit oluşturma, metal ve metal dışı katkılar ekleme, karbon esaslı malzemeler ile modifiye etme gibi yöntemler kullanılmaktadır [5,9–12]. Son yıllarda özellikle karbon esaslı malzemelerden; karbon nanotüp [13], grafen [14] ve indirgenmiş grafen oksit [15] gibi katkıların TiO<sub>2</sub> yapısına eklenerek modifiye edilmesiyle fotokatalitik özelliklerin iyileştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Grafen tek atom kalınlığında, karbon atomlarının altıgen yapıda bir araya gelmesiyle oluşan iki boyutlu bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Bu malzeme yüksek elektron taşıma kapasitesi, çok geniş yüzey alanı, yüksek termal ve elektriksel iletkenlik gibi birçok üstün özelliğe

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : metin.yurddaskal@deu.edu.tr

sahip olması sebebiyle son zamanlarda ileri teknoloji malzeme çalışmalarında kullanımı oldukça önem kazanmıştır [16–18]. Grafen, geniş yüzey alanına sahip olmasının yanı sıra yüksek elektron mobilitesi, absorplama ve ışığa karşı duyarlılığı artırma yetenekleri sayesinde ışıkla uyarılmış olan elektronları  $TiO_2$  bant aralığında hızlıca ileterek yariletken malzemelerin fotokatalitik aktivitesini geliştirmektedir [16,19–22]. Ancak, grafenin hidrofobik yapıda olması çözelti içerisinde homojen bir şekilde dağılmasını engellemektedir. Sıvı ortam içerisinde grafen oksite hidroksil, karboksil ve ester gibi oksijen içerikli fonksiyonel grupların bağlı olması tabakaların kolay ve homojen bir şekilde ayrışmasına katkı sağlamaktadır. Literatürde etkili ve kolay bir şekilde GO sentezlemek için modifiye edilmiş Hummers yöntemi oldukça sık kullanılmaktadır [23,24]. Ancak bu fonksiyonel grupların GO yapısına eklenmesiyle elektron hareketliliğini de azalmaktadır. Bu nedenle daha kararlı yapıda olan ve grafen ile benzer özellikler gösteren rGO fotokatalitik çalışmalarda karbon içerikli katkı olarak tercih edilmektedir [16,25,26].

Bu çalışmada, Hummers yöntemi ile elde edilen GO kimyasal işlemlerle indirgenerek rGO elde edilmiştir. Sentezlenen rGO, farklı katkı oranlarıyla  $TiO_2$  yapısına ilave edilerek sol-jel yöntemi ile  $TiO_2$ /rGO kompozitleri üretilmiştir. Sol-jel yöntemiyle üretilen saf  $TiO_2$  ve ağırlıkça % 0,5, 1, 2, 4 ve 6 rGO katkısıyla elde edilen  $TiO_2$ /rGO kompozitlerinin yapısal, morfolojik ve fotokatalitik özellikleri detaylıca incelenmiştir.

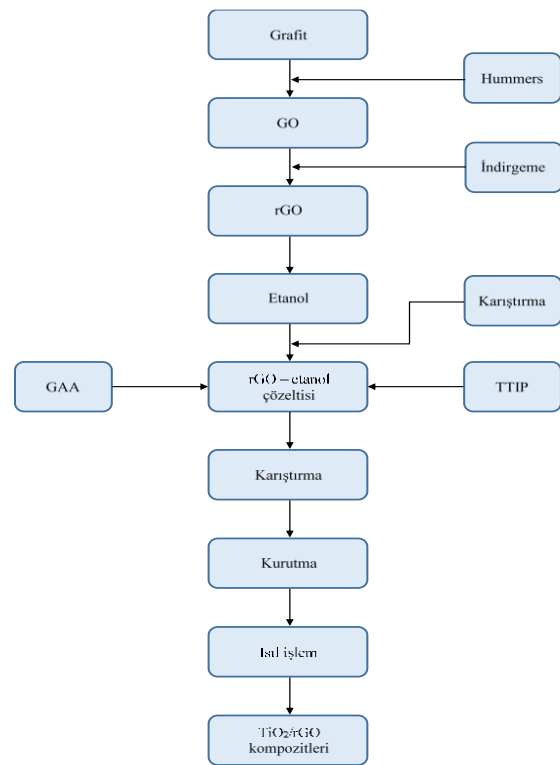
## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Grafit tozu kullanılarak grafen oksit sentezlenmesinde Hummers metodundan faydalanılmıştır. Bir beherdeki 25 ml sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) içerisine 1 g grafit eklendikten sonra buz banyosu içerisinde sıcaklık  $20\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altında olacak şekilde 600 rpm hızda manyetik karıştırıcıda 30 dk boyunca karıştırılmıştır. Ardından 3 g potasyum permanganat ( $KMnO_4$ ) çok yavaş bir şekilde çözeltinin içine eklendikten sonra aynı sıcaklığı koruyarak 3 saat boyunca karıştırmaya devam edilmiştir. Daha sonra, artmaya başlayan sıcaklık  $50\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altındaki değerlerde tutularak çözelti içerisine 150 ml saf su yavaşça eklenmiştir. Çözeltinin rengi siyahtan kahverengi oluncaya kadar yaklaşık 1 saat boyunca karıştırma işlemi sürdürülmüştür. Renk değişimi gözlemlendikten sonra 5 ml hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) çözeltiye eklenerek 1 saat daha karıştırılmıştır. Bu işlemlerin tamamlanmasının ardından çözeltiden alınan GO tozları yıkama işlemleri için 900 ml saf su ve 100 ml hidroklorik asit (HCl) içerisine eklenmiştir. 10 dakika karıştırılan çözelti 5000 rpm hızda 20 dk boyunca 3 defa santrifüj işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen GO tozları  $80\text{ }^\circ\text{C}$ 'de kurutulmuştur.

İndirgenmiş grafen oksit tozlarının elde edilebilmesi için sentezlenen GO tozları 3mg/ml oranında saf su içerisinde çözeltiye alınmıştır. 1µl/3mg oranında hidrazin hidrat

( $N_2H_4$ ) bu çözeltiye eklenip 300 rpm hız ve  $80\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 12 saat boyunca reflux sistemi kullanılarak karıştırılmıştır. Karıştırma işleminden sonra elde edilen çözelti 2 defa santrifüj ile yıkama işlemine tabi tutulmuş ve elde edilen rGO tozları  $80\text{ }^\circ\text{C}$ 'de kurutulmuştur.

Ağırlıkça % 0,5, 1, 2, 4 ve 6 rGO katkılı  $TiO_2$ /rGO kompozitlerinin üretilmesi için belirtilen oranlarda rGO, 5 ml titanyum tetraizopropoksit (TTIP) ve 3 ml glasiyal asetik asit (GAA) karışımı hazırlanarak oda sıcaklığında 5 saat boyunca karıştırılmıştır. Jelleşme sonrası kurutulmuş malzemeye  $500\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 2 saat boyunca ısı işlemi yapılmıştır [27]. Elde edilen  $TiO_2$ /rGO kompozitlerin içerisinde bulunan rGO miktarını gösterecek şekilde numuneler T0, T05, T1, T2, T4 ve T6 olarak isimlendirilmiştir. Üretim sürecinin tüm aşamaları Şekil 1'de detaylı olarak gösterilmiştir.



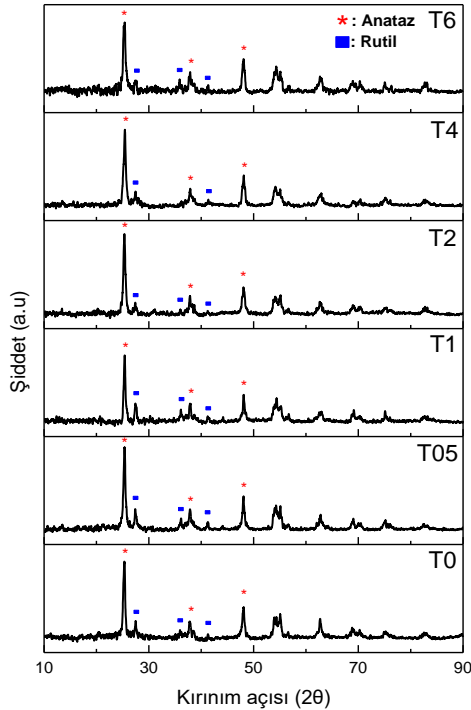
Şekil 1. Sol-jel yöntemiyle  $TiO_2$ /rGO kompozit üretimi akış şeması ( $TiO_2$ /rGO composite production flow chart by sol-gel method)

Farklı katkı oranlarına sahip  $TiO_2$ /rGO kompozitlerinin faz yapısı, Ni-filtreli Cu  $K\alpha$  ışınmasına sahip X-ışını kırınımı (XRD, Thermo ARL X'TRA) kullanılarak incelenmiştir. X-ışını kırınım analizleri  $2^\circ/\text{dk}$  hızında  $5^\circ$ - $90^\circ$  aralığında gerçekleştirilmiştir.  $TiO_2$ /rGO kompozitlerin yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM, Coxem EM-30 Plus) kullanılarak incelenmiştir.  $TiO_2$ /rGO kompozitlerinde katkı oranına bağlı olarak değişen fonksiyonel grupların ve kimyasal bağların incelenmesi amacıyla Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR, Thermo Scientific Nicolet IS10) kullanılmıştır.

Farklı rGO oranlarında üretilen  $TiO_2$ /rGO kompozitlerin fotokatalitik özelliklerini belirlemek amacıyla her birinden 0,03 g toz alınarak  $10^{-5}$  M konsantrasyona sahip 30 ml metilen mavisi (MM) çözeltilerine eklenmiştir. Fotokatalitik reaktör içerisine yerleştirilen çözeltiler 240 dk boyunca 300 Watt gücündeki Osram UltraVitalux E27 UV lamba (%4,53 UVA, %1 UVB, %94,47 Vis) ile uyarılıp belirli zaman aralıklarında örnekler alınarak UV-Vis spektrofotometresi (UV-Vis, UV-1240 Shimadzu Spectrophotometer) ile absorpsiyon değerleri ölçülmüştür.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

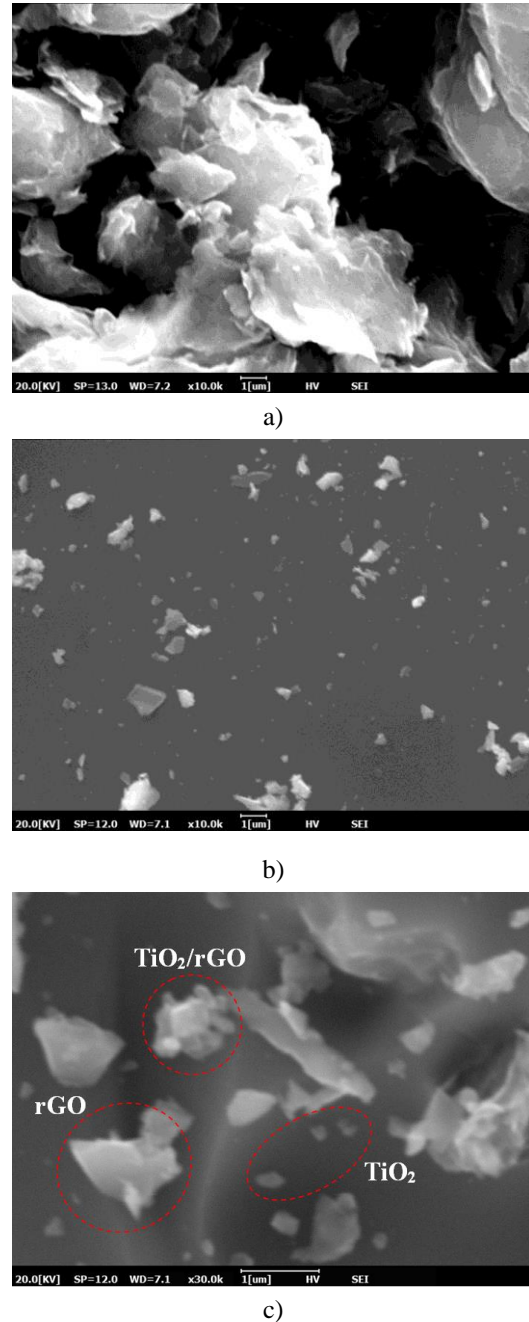
Şekil 2’de  $TiO_2$ /rGO kompozitlerine ait XRD grafikleri verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde  $TiO_2$ ’ye ait anataz ve rutil fazları görülmektedir. Yapı içerisindeki fazların % 93’ünün anataz fazı ve % 7’sinin rutil fazı olarak bulunduğu paket programlar aracılığıyla tespit edilmiştir. Elde edilen grafikler anataz fazına ait JCPDS no: 00-021-1272 ile uyumaktadır [28].  $TiO_2$ ’ye ait 25,38, 37,96, 48,04, 53,94 ve 54,20 derecelerinin sırasıyla 101, 004, 200, 105 ve 211 düzlemlerine ait karakteristik piklerin belirgin bir şekilde anataz fazına ait olduğu görülmektedir. rGO’ya ait olan  $26^\circ$  civarındaki yaygın pikin şiddeti, katkı oranının az olması nedeniyle oldukça düşüktür. Söz konusu pikin anataz fazındaki  $TiO_2$ ’ye ait olan  $25.38^\circ$ ’deki 101 düzlemini belirten pike kıyasla görülemeyecek kadar küçük kaldığından dolayı spektrum üzerinde gösterilememiştir.



Şekil 2. Numunelere ait XRD desenleri (XRD patterns of the samples)

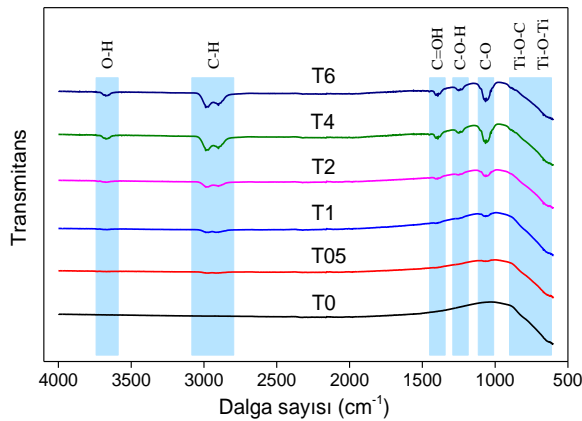
Şekil 3a’daki SEM görüntüsü incelendiğinde kıvrımlı şekilde oluşmuş 2 boyutlu rGO levhaları görülmektedir.

Şekil 3b’de ise sol-jel yöntemiyle sentezlenen  $TiO_2$  parçacıklarının nano boyutlu olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra bir miktar topaklanma olduğu da gözlemlenmektedir. Şekil 3c’de rGO yüzeyine tutunmuş  $TiO_2$  nano parçacıklarından oluşan  $TiO_2$ /rGO yapısı açıkça görülmektedir. Aynı zamanda yapı içerisinde birbiri ile etkileşimde bulunmamış olan serbest rGO ve  $TiO_2$ ’ler de bulunmaktadır.  $TiO_2$  nanoparçacıkları, rGO levhaları ve  $TiO_2$ /rGO kompozit yapıları Şekil 3c’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Numunelere ait SEM görüntüleri (a) rGO, (b)  $TiO_2$  (c) % 4 rGO katkılı  $TiO_2$ /rGO kompoziti (SEM images of the samples (a) rGO, (b)  $TiO_2$  (c)  $TiO_2$ /rGO composite with 4% rGO)

TiO<sub>2</sub>/rGO kompozitlerine ait Ti-O-Ti ve Ti-O-C titreşimlerinin ve katkı oranına bağlı olarak değişen fonksiyonel grupların ve kimyasal bağların incelenmesi amacıyla elde edilen FTIR sonuçları Şekil 4'te görülmektedir. Dalga sayısı 1000 cm<sup>-1</sup>'in altındaki değerlerde Ti-O-Ti ve Ti-O-C bağ yapısına ait bölge görülmektedir [29–31]. Yapı içerisindeki rGO katkı miktarının artmasıyla birlikte rGO'ya ait olan 1000-3500 cm<sup>-1</sup> dalga sayıları arasındaki karakteristik C-O (1064 cm<sup>-1</sup>), C-O-H (1240 cm<sup>-1</sup>), C=OH (1400 cm<sup>-1</sup>), C-H (2900 – 2990 cm<sup>-1</sup>) ve O-H (3670 cm<sup>-1</sup>) pikleri de katkı oranıyla orantılı olarak büyümüşür [26,30,32–34]. FTIR analizinden de anlaşılacağı üzere TiO<sub>2</sub>/rGO kompozitlerin üretiminin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği söylenebilir.



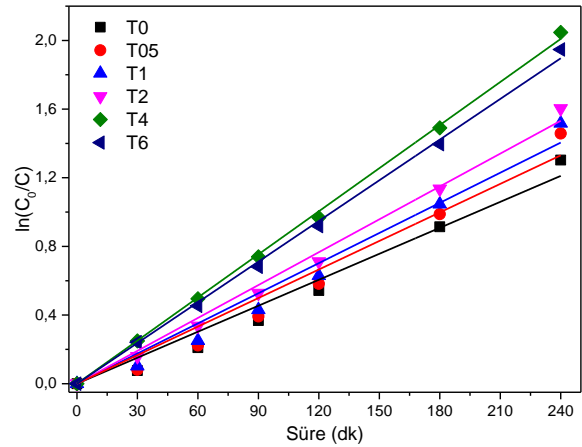
Şekil 4. Numunelere ait FTIR spektrumları (FTIR spectra of the samples)

10<sup>-5</sup> molarlık MM içerisine eklenen TiO<sub>2</sub>/rGO kompozitlerinin fotokatalitik performansları belirli zaman aralıklarında MM'nin absorptans verilerinin ölçülmesiyle değerlendirilmiştir. Fotokatalitik etki ile fotokatalizörler zamanla MM sulu çözeltisini parçalayarak renginin giderilmesine sebep olmaktadır. MM'nin 664 nm'deki karakteristik pikine ait absorptans değerlerinden Lambert-Beer yasası kullanılarak konsantrasyon verileri elde edilmiştir [10]. Elde edilen ln(C<sub>0</sub>/C) değerlerinin zamanla değişimi Şekil 5'e aktarılmıştır. Bu değerlerin birinci dereceden Lambert-Beer yasasına uyumlu olduğu belirlenmiş ve aşağıdaki denklem kullanılarak fotokatalitik parçalanma hızı tüm numuneler için hesaplanmıştır. Tüm numunelere ait fotokatalitik parametreler Çizelge 1'de verilmiştir.

$$\ln \frac{C_0}{C} = kt \quad (1)$$

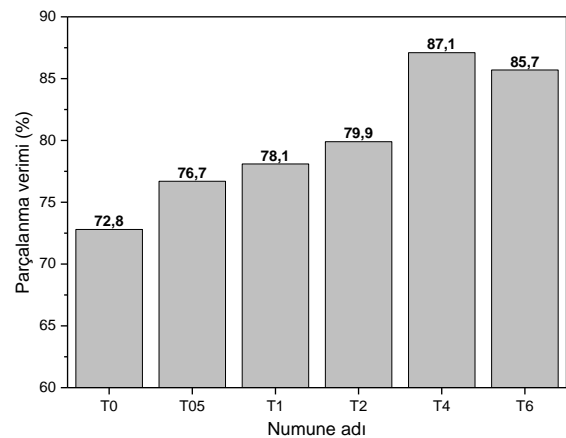
Bu denklemde C<sub>0</sub>; MM'nin başlangıç konsantrasyonunu, C ise herhangi bir t anındaki konsantrasyonunu vermektedir. Parçalanma hızı ise k olarak gösterilmiştir. Şekil 5'te oluşturulan grafiğin eğimi k değerini vermektedir. Elde edilen k değerleri, MM'nin fotokatalitik parçalanmasının TiO<sub>2</sub>/rGO kompozitlerindeki rGO miktarının artmasıyla önemli ölçüde arttığını göstermektedir. T4 numunesi maksimum

parçalanma hızına sahip olmuştur. Bu katkı oranından daha yüksek katkı oranına sahip T6 numunesi kullanılarak MM'nin parçalanmasının azaldığı görülmektedir.



Şekil 5. TiO<sub>2</sub>/rGO kompozitlerinin fotokatalitik performansları (Photocatalytic performances of the TiO<sub>2</sub>/rGO composites)

664 nm'deki başlangıç absorptans değeri 0,666 olan MM'nin farklı numuneler tarafından parçalanma verimleri hesaplanmış ve Çizelge 1'de belirtilmiş ve Şekil 6'ya aktarılmıştır. Bu grafik incelendiğinde T4 kompozitinin en iyi fotokatalitik performans sergilediği görülmektedir. T4 numunesi MM'yi 240 dakikada % 87,1 oranında parçalanırken, T0 numunesi ise % 72,8 oranında parçalanma verimi göstermiştir. Diğer bir deyişle, %4 rGO katkılı TiO<sub>2</sub>/rGO kompoziti saf TiO<sub>2</sub>'ye göre % 20 oranında daha fazla parçalanma verimi sergilemiştir. Bir diğer gözlem olarak da, T4 numunesine kadar fotokatalitik performans artarken T6 numunesinde ise bu performansın azaldığı görülmektedir.



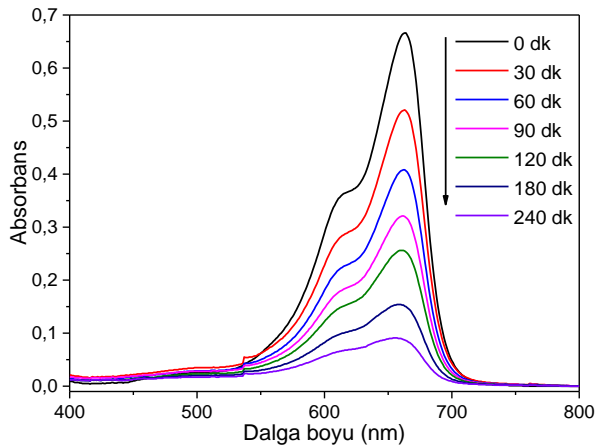
Şekil 6. Farklı kompozitler tarafından parçalanmış MM'nin UV ışık kaynağı altındaki parçalanma verimleri (Degradation efficiencies of MB by different composites under UV irradiation)



**Çizelge 1.** Numunelere ait fotokatalitik parametreler (Photocatalytic parameters of the samples)

Numune adı	T0	T05	T1	T2	T4	T6
Parçalama verimi (%)	71,8	78,1	79,9	76,7	87,1	85,7
Parçalanma hızı (k) ( $10^{-4}, dk^{-1}$ )	50,5	55,4	58,5	63,8	83,7	79
R <sup>2</sup>	0,9943	0,9926	0,9947	0,9986	0,9998	0,9996

Fotokatalitik performans ve MM'nin parçalanma verimi grafikleri incelendiğinde en iyi fotokatalitik performansın T4 numunesi ile sağlandığı açıkça görülmektedir. T4 numunesine ait fotokatalitik parçalanma grafiği farklı süreler için oluşturulmuş ve Şekil 7'de gösterilmiştir. 664 nm'deki başlangıç absorbans değeri 0,666 olan MM, T4 numunesi kullanılarak UV ışık kaynağı altında 240 dk boyunca parçalanmış ve absorbans değeri 0,0086'ya düşürülmüştür.

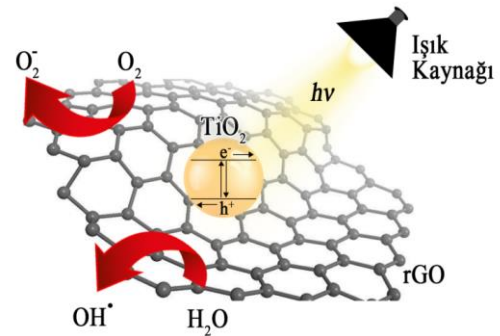
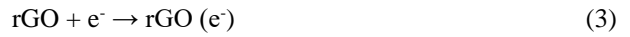


**Şekil 7.** T4 numunesinin varlığında MB çözeltisinin zamana bağılı absorpsiyon spektrumları (The time dependent absorption spectra of the MB solution in the presence of the T4 sample)

TiO<sub>2</sub>/rGO kompozitlerinin fotokatalitik mekanizması Şekil 8'de gösterilmektedir. Işıkla uyarıldığında TiO<sub>2</sub>'nin valans bandındaki elektronların iletim bandına geçişi sağlanır. Böylece valans bandında boşluklar (h<sup>+</sup>) oluşurken elektronlar (e<sup>-</sup>) iletim bandına geçer. TiO<sub>2</sub> normalde ışıkla uyarıldığında elektron boşluk çiftleri hızlıca yeniden birleşir. Ancak rGO yapıya katıldığında iletkin banda geçen elektronlar valans bandındaki boşluklara geri gelmek yerine elektriksel iletimi çok iyi olan rGO levhaları üzerine geçiş yapma eğiliminde olurlar. Elektron boşluk yeniden birleşmesi engellendiği için fotokatalitik özellikler T4 numunesine kadar iyileşmiştir. Ancak T6 numunesinde fotokatalitik verimin düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi olarak artan rGO miktarı TiO<sub>2</sub> nano parçacıkları ile ışık kaynağı arasında bir bariyer gibi davranması sonucu UV

ışık kaynağı tarafından oluşturulan yük taşıyıcılarının konsantrasyonunun nispeten azalması gösterilebilir

[35,36]. Oksijen molekülleri (O<sub>2</sub>), ışıkla uyarıldığında TiO<sub>2</sub>/rGO kompozitindeki TiO<sub>2</sub>'den ortaya çıkan O<sub>2</sub>'ler ile indirgenerek süper oksit radikal anyonlarını ( $\bullet O_2^-$ ) oluştururlar. Bu  $\bullet O_2^-$  yapıları ise MM'yi karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve su (H<sub>2</sub>O) olarak parçalar. MM'nin UV ışık kaynağı altındaki parçalanması esnasında gerçekleşen reaksiyonları şu şekilde sıralayabiliriz:



**Şekil 8.** Fotokatalitik parçalanma mekanizmasının şematik gösterimi (Schematic illustration of photocatalytic degradation mechanism)

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan bu çalışmada, Hummers metodu ile üretilen GO'dan kimyasal indirgeme yöntemi kullanılarak rGO sentezlenmiştir. Elde edilen rGO levhaları, belirlenen oranlarda kullanılarak sol-jel yöntemiyle TiO<sub>2</sub>/rGO kompozitleri üretilmiştir. 500°C'de, 2 saat boyunca ısı işleme tabi tutulan numunelere XRD, SEM ve FTIR karakterizasyon işlemleri uygulanmıştır. Bu karakterizasyon çalışmaları ile numunelerin faz yapısı, kimyasal bağ yapısı ve yüzey morfolojileri incelenmiştir. XRD analizi sonucunda faz yapısının anataz fazı ile uyumlu olduğu, SEM analizi ile rGO ve TiO<sub>2</sub>'nin bir arada bulunduğu, FTIR analizi ile yapıda bulunan bağlara ait karakteristik piklerin büyüklüğünün, katkı oranı ile orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Uv-vis spektroskopisi ile elde edilen absorbans verileri

kullanılarak fotokatalitik verim değerleri elde edilmiştir. Daha sonra Lambert-Beer dönüşümü yardımıyla fotokatalitik hız değerleri tüm numuneler için hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlere göre en iyi fotokatalitik performansı T4 numunesi göstermiştir. Özetle, yüksek performanslı fotokatalizör kompozitlerin oluşturulmasında rGO etkin bir şekilde rol oynamıştır. rGO, fotokatalizörün toplam yüzey alanını artırarak nispeten geniş bant aralıklı bir yarı iletken olan TiO<sub>2</sub>'nin UV ışık altındaki absorpsiyon yeteneğini geliştirmiştir. Bu çalışma sonucunda rGO levhalarının, TiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları ile bir araya getirilmesiyle organik kirliliklerin giderilmesinde verimli bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. Dargahi, Z., Asgharzadeh, H. and Maleki-Ghaleh, H. "Synthesis of Mo-doped TiO<sub>2</sub>/reduced graphene oxide nanocomposite for photoelectrocatalytic applications" *Ceramics International*, 44(11): 13015–13023, (2018).
- [2]. Ge, M., Chunyan, C., Jianying, H., Shuhui L., Zhong C., Ke Q. Z., Al-Deyab S. S., and Yuekun L. "A review of one-dimensional TiO<sub>2</sub> nanostructured materials for environmental and energy applications" *Journal of Materials Chemistry A*, 4(18): 6772-6801, (2016).
- [3]. Truppi, A., Francesca, P., Tiziana, P., Marinella, S., Angela, A., Maria, C., and Roberto, C. "Visible-light-active TiO<sub>2</sub>-based hybrid nanocatalysts for environmental applications" *Catalysts*, 7(4): 100, (2017).
- [4]. Kim, Ki D., Ta,e Jin L., and Hee, Taik K. "Optimal conditions for synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles in semi-batch reactor." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 224(1-3): 1-9, (2003).
- [5]. Khan, H., Zhuoran, J., and Dimitrios, B. "Molybdenum doped graphene/TiO<sub>2</sub> hybrid photocatalyst for UV/visible photocatalytic applications." *Solar Energy*, 162: 420-430, (2018).
- [6]. Maeda, Kazuhiko. "Photocatalytic water splitting using semiconductor particles: history and recent developments." *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 12(4): 237-268, (2011).
- [7]. Mamba, G., Mbianda, X. Y., and Mishra, A. K. "Gadolinium nanoparticle-decorated multiwalled carbon nanotube/titania nanocomposites for degradation of methylene blue in water under simulated solar light." *Environmental Science and Pollution Research*, 21(8): 5597–5609, (2014).
- [8]. Sreeja, S., and Vidya Shetty, K. "Photocatalytic water disinfection under solar Irradiation by Ag@TiO<sub>2</sub> core-shell structured nanoparticles." *Solar Energy*, 157: 236-243, (2017).
- [9]. Behpour, M., Rozita Foulady, D., and Noshin M. "Considering photocatalytic activity of N/F/S-doped TiO<sub>2</sub> thin films in degradation of textile Waste under visible and sunlight irradiation." *Solar Energy*, 158: 636–643, (2017).
- [10]. Demirci, S., Dikici, T., Yurddaskal, M.,Gultekin, S., Toparli, M., and Celik, E. "Synthesis and characterization of Ag doped TiO<sub>2</sub> heterojunction films and their photocatalytic performances." *Applied Surface Science*, 390: 591-601, (2016).
- [11]. Kaur, T., Sraw, A., Toor, A., P., and Wanchoo, R.K. "Utilization of solar energy for the degradation of carbendazim and propiconazole by Fe doped TiO<sub>2</sub>." *Solar Energy*, 125: 65–76, (2016).
- [12]. Yurtsever, H., A., and Çiftçioğlu, M. "Nadir toprak elementi katkili kimyasal çöktürme titanya tozlari ile yapay fotosentezle hidrojen üretimi." *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 17(50): 54-67, (2015).
- [13]. Ahmmad, B., Kusumoto, Y., Somekawa, S., and Ikeda, M. "Carbon nanotubes synergistically enhance photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub>." *Catalysis Communications*, 9(6): 1410-1413, (2008).
- [14]. Shi, J., Chen, G., Zeng, G., Chen, A., He K., Huang, Z., Hu, L., Zeng, J., Wu J., and Liu, W. "Hydrothermal synthesis of graphene wrapped Fe-doped TiO<sub>2</sub> nanospheres with high photocatalysis performance." *Ceramics International*, 44(7): 7473-7480, (2018).
- [15]. Vasilaki, E., Georgaki, I., Vernardou, D., Vamvakaki, M., and Katsarakis, N. "Ag-loaded TiO<sub>2</sub>/reduced graphene oxide nanocomposites for enhanced visible-light photocatalytic activity." *Applied Surface Science*, 353: 865–872, (2015).
- [16]. Isari, A.A., Payan, A., Fattahi, M., Jorfi, S., and Kakavandi, B. "Photocatalytic degradation of rhodamine B and real textile wastewater using Fe-doped TiO<sub>2</sub> anchored on reduced graphene oxide (Fe-TiO<sub>2</sub>/RGO): characterization and feasibility, mechanism and pathway studies." *Applied Surface Science*, 462: 549–564, (2018).
- [17]. Li, X., Shen, R., Ma, S., Chen, X., and Xie, J., "Graphene-based heterojunction photocatalysts." *Applied Surface Science* 430: 53-107, (2018).
- [18]. Min, S., Hou, J., Lei, Y., Ma, X., and Lu, G. "Facile one-step hydrothermal synthesis toward strongly coupled TiO<sub>2</sub>/graphene quantum dots photocatalysts for efficient hydrogen evolution." *Applied Surface Science*, 396: 1375–1382, (2017).
- [19]. Chen, C., Zhang Y., Zeng, J., Zhang, F., Zhou, K., Bowen, C.R., and Zhang, D. "Aligned macroporous TiO<sub>2</sub>/chitosan/reduced graphene oxide (rGO) composites for photocatalytic applications." *Applied Surface Science*, 424: 170-176, (2017).
- [20]. Cheng, L., Xiang, Q., Liao, Y., and Zhang, H. "CdS-based photocatalysts." *Energy & Environmental Science*, 11(6): 1362-1391, (2018).
- [21]. Xiang, Q., Yu, J., Jaroniec, M., "Graphene-based semiconductor photocatalysts." *Chem. Soc. Rev.*, 41(2): 782-796, (2012).
- [22]. Xu, Y., Mo, Y., Tian, J., Wang, P., Yu H., and Yu, J. "The synergistic effect of graphitic N and pyrolic N for the enhanced photocatalytic performance of nitrogen-doped graphene/TiO<sub>2</sub> nanocomposites." *Applied Catalysis B: Environmental*, 181: 810-817, (2016).
- [23]. Hummers, W.S., and Richard E.O. "Preparation of graphitic oxide" *Journal of the American Chemical Society*, 80(6): 1339-1339, (1958).
- [24]. Moon, I.K., Lee, J., Ruoff, R.S., and Lee, H. "Reduced graphene oxide by chemical graphitization." *Nature Communications*, 1: 73, (2010).

- [25]. Fan, W., Yu, X., Lu, H.C., Bai, H., Zhang, C., and Shi W. "Fabrication of TiO<sub>2</sub>/RGO/Cu<sub>2</sub>O heterostructure for photoelectrochemical hydrogen production" *Applied Catalysis B: Environmental*, 181: 7-15, (2016).
- [26]. Xiang, Q., Yu, J., and Jaroniec, M. "Enhanced photocatalytic H<sub>2</sub>-production activity of graphene-modified titania nanosheets." *Nanoscale*, 3(9): 3670, (2011).
- [27]. Erol, M., and Bilgin, K. "Boron doped titanium dioxide nanotube arrays: production, characterization and photocatalytic properties" *Journal of Porous Materials*, 24(5): 1295-1302, (2017).
- [28]. Yurddaskal, M., Dikici, T., Yildirim, S., Yurddaskal, M., Toparli, M., and Celik, E. "Fabrication and characterization of nanostructured anatase TiO<sub>2</sub> films prepared by electrochemical anodization and their photocatalytic properties." *Journal of Alloys and Compounds*, 651: 59-71, (2015).
- [29]. Liu, J., Bai, H., Wang, Y., Liu, Z., Zhang, X., and Sun, D.D. "Self-assembling TiO<sub>2</sub> nanorods on large graphene oxide sheets at a two-phase interface and their anti-recombination in photocatalytic applications." *Advanced Functional Materials*, 20(23): 4175-4181, (2010).
- [30]. Tan, L., Ong, W.J., Chai, S.P., and Mohamed, A.R. "Reduced graphene oxide-TiO<sub>2</sub> nanocomposite as a promising visible-light-active photocatalyst for the conversion of carbon dioxide" *Nanoscale Research Letters*, 8(1): 465, (2013).
- [31]. Wang, P., Zhan, S., Xia, Y., Ma, S., Zhou, Q., and Li, Y. "The fundamental role and mechanism of reduced graphene oxide in RGO/Pt-TiO<sub>2</sub> nanocomposite for high-performance photocatalytic water splitting." *Applied Catalysis B: Environmental*, 207: 335-346, (2017).
- [32]. Karimi, L., Yazdanshenas, M.E., Khajavi, R., Rashidi, A., and Mirjalili, M. "Using graphene/TiO<sub>2</sub> nanocomposite as a new route for preparation of electroconductive, self-cleaning, antibacterial and antifungal cotton fabric without toxicity." *Cellulose*, 21, (5): 3813-3827, (2014).
- [33]. Li, G., Wang, T., Zhu, Y., Zhang, S., Mao, C., Wu, J., Jin, B., and Tian, Y. "Preparation and photoelectrochemical performance of Ag/Graphene/TiO<sub>2</sub> composite film." *Applied Surface Science*, 257(15): 6568-6572, (2011).
- [34]. Williams, G., Seger, B., and Kamat, P.V. "TiO<sub>2</sub>-graphene nanocomposites. UV-assisted photocatalytic reduction of graphene oxide." *ACS Nano*, 2(7): 1487-1491, (2008).
- [35]. Police, A.K.R., Chennaiahgari, M., Boddula, R., Vattikuti, S.V.P., Mandari, K.K., and Chan, B. "Single-step hydrothermal synthesis of wrinkled graphene wrapped TiO<sub>2</sub> nanotubes for photocatalytic hydrogen production and supercapacitor applications" *Materials Research Bulletin*, 98: 314-321, (2018).
- [36]. Nainani, R.K., and Thakur, P. "Facile synthesis of TiO<sub>2</sub>-RGO composite with enhanced performance for the photocatalytic mineralization of organic pollutants." *Water Science and Technology*, 73(8): 1927-1936, (2016).