

### İÇİNDEKİLER / CONTENTS

	Sayfa No
<b>Burak YENİPİRAR, Cemal YILMAZ, Yusuf SÖNMEZ, Mehmet Faah İŞİK (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Asenkron Motorların Rotor Diğarının Farklı Optimizasyon Yöntemleri ile Optimizasyonun Gerçekleştirilmesi ve Performans Etkilerinin İncelenmesi Optimizing the Rotor Slot Dimensions of Asynchronous Motor Using Different Optimization Methods and Investigating Effects on the Motor Performance.....	1-6
<b>Rıttı DOĞAN, Hisametullah İAN (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Salgın-Su, Esaslı Sıranık Kesici Uçların İstikrarlı İncelenmesi Investigation of Thermal Conductivity of Ceramic Cuttin Edge Based Sialon-SiN.....	7-12
<b>Mustafa SÖYLEER, Mustafa AKTAS (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> İstikrarlı Akışkan Olarak Eriyik Gaz Kullanılan Bir Grönde Bort Tipi İstikrarlı İncelenmesi Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Programı ile Analizi Analysis with Computational Fluid Dynamics Software of a Shell-and-Tube Heat Exchanger Using Molten Salt as Heat Transfer Fluid.....	13-17
<b>Ömer YILMAZ, Catiilma Nalulu CHEABURU-YILMAZ (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Synthesis and Application of a Low Emalifer Content Composite Polyacrylic Latex for Leather Finishing Deri Finitajı İçin Düşük Emalifer İçerikli Kompozit Yapılı Bir Poliakirik Latex Sentezi ve Uygulanması.....	19-25
<b>Ezgi GENEL, Mustafa URBAN, Yusuf Tanel KÇ, Veli MIZRAK, Serkan GENEL (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Kam Makarasının Da Çap Yüzey Taşlama İşleminde Etkili Olan Faktörlerin Deney Tasarımı Kullanılarak Erişilmesi Optimization of the Factors That are Critical in External Surface Grinding of roller Followers Using Design of Experiments.....	27-37
<b>İlker TEKİN, Duygu TEKİN (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Taban Kılıfı İçine Edilmiş Kompozit Cimentolarda Süperakışkanlığı Etkisinin Araştırılması Investigation of Superplasticizer Effect on Blended Cements Replaced By Bottom Ash.....	39-46
<b>Faah DEMIRELİ, Şaban GİL İLİLU, Zahra ÖZÇETİN (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Çevre ve Sağlık İçin Hizmet Binası Konferans Salonuna Yönelik Akustik Performans Çalışması Acoustic Performance Study For The Conference Hall of Ministry of Environment and Urbanization Service.....	47-53
<b>Merve SENTEK ACAR, Mehmet SAKARYAR, Özgür ARSLAN (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Linyit Üretim Prosesinin Ekserjistik Değerlendirilmesi: Sü Örneği Exergetical Evaluation of Lignite Production Process: SÜ Case Study.....	55-63
<b>Serdar Değirgen AKBAŞ (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> İki Malzemeli Kompozit Bir Kiriğin Serbest ve Zorlanmış Titreşimlerinin İncelenmesi Investigation on Free and Forced Vibration of a Bi-Material Composite Beam.....	65-73
<b>Zihni YAZAR, İhsan ALP (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Comparison of Solid Waste Management Performances of Turkey and EU countries associated with Malmquist Index Türkiye ile AB Ülkelerinin Katı Atık Yönetimi Performanslarının Malmquist Endeksi ile Karşılaştırılması.....	75-81
<b>Hassan POURGHAFARİ SEFIDHEKHAJ, Osman SENSE (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Farklı Olanlıda Gerilim Durumları İçin Betonun Agregatı Kullanılarak Üretilen Betonun Bazı Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması Investigation of Some Engineering Properties of Concrete Made With Recycled Aggregate in Different Ratios.....	83-91
<b>Mustafa İLBAS, Esat YANIK, Serhan KARVEYEN (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Kok Gazı Gazı ve Enerji Üretimi İçin Gazın Oksijen Zenginleştirilmesi Yöntemi: Sayısal Bir Çalışma Oxygen Enriched Combustion of Coke Oven Gas and Generator Gas: A Numerical Study.....	93-100
<b>Mustafa Yavuz ÇELİK, Ayşe ERGİL (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Yeni Karakterizasyon Yöntemi: Tuzlu Üstünlü İnşaatı İçin Kullanılan Volkanik Tufllara Gözetlik Özellikleri New Characterization of Volcanic Tuff Used as Building Stone in Aysenkanlıhar (Turkey).....	101-112
<b>Emre ERKAN, Bengi ARISOY, Emin HÖKELEKÇİ (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Miranda Khajishvili, Nuzgar Gomidze, Izolda Jabanidze, Kakha Makharadze, Manana Chikhladze (Araştırma Makalesi/ Research Article) Evolution Bandwidth of Optical Signal via Statistical Moments of Random Phase Screen.....	113-121
<b>Egemen SULLUKAN (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Wave Energy Potential Assessment for Riva and Foça, Turkey Riva ve Foça, Türkiye İçin Dalga Enerji Potansiyeli Değerlendirilmesi.....	129-135
<b>N. Göksoy SÖYDAN, Özgür SİMŞEK, M. Sami AKOZ (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Köprü Ayağı Etrafındaki Türbülanslı Akımın Sayısal ve Deneyel Analizi Experimental and Numerical Analysis of Flow around a Circular Bridge Pier.....	137-147
<b>Ayşe MURATHAN, Emine BAYIL, Abner KOÇ, Hatice B. MURATHAN (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Alüminyum Eloksallı Aukların Yanma Geçiriciliği Olarak Değerlendirilmesi Evaluation of Aluminum Anodic Wastes as Flame Retardant.....	149-154
<b>Hadi ATALAY, M. Turhan COBAN (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Çapraz Akışlı Hava-Gaz İstikrarlı Değiricisinin Sonlu Farklar Metodu Kullanılarak Modellemesi Modeling of Cross Flow Air-Gas Heat Exchanger Using Finite Difference Method.....	155-163
<b>İlker Bekir TOPÇU, Eyyup GÜBRANILAR, Ahmet Burak KOC (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Reaktif Pudra Betonlarının Basınç Dayanımının ANFIS ile Tahmini Predicting the Compressive Strength of Reactive Powder Concrete by ANFIS.....	165-171
<b>Önder YAKIT, Serdar SOLAK, Emine Değir BOLAÇ (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> EKG İşareti İçin Giritililerin Temizlenmesi İçin İBR Tabanlı Sayısal Filtre Tasarımı EKG İşareti İçin Giritililerin Temizlenmesi İçin İBR Tabanlı Sayısal Filtre Tasarımı.....	173-181
<b>Takay SAHİN, Naim Sileyman TING (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Darbe Genişlik Modülasyonu DA DA Dönüşürücü İçin Yeni Bir Yumuşak Anahartlamalı Pasif Bastırma Hücresi A Novel Soft Switching Passive Smalber Cell for Pulse Width Modulation DC-DC Converters.....	183-192
<b>Cebal ÖZER, Vedat TAŞDEMİR (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Alüminyum Alaşımının Derin Çekilmesine Sıcaklığın Etkisinin Deneyel ve Sayısal Olarak Araştırılması Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Temperature on Deep Drawing of Aluminum Alloy.....	193-199
<b>Emre ACAR, Murat AYDIN (Derleme Makalesi/ Review Article)</b> Şekli Hafıza Davranışlarının Termodinamiği Thermodynamics of Shape Memory Behavior.....	201-211
<b>Murat İldge ÖZKAN, Hisayin Alp ÇETİNDAG, İhsan TOKTAS (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Eşit Miktarlı Filament Kullanımı ile 3 Boyutlu Baskı Yapılacak Ankastr Kirişlerin Çekme Basma Mukavemetine Göre Kesit Geometrilirinin Belirlenmesi Determination of Cross Sectional Geometries of Beams According to Tension and Compression Strength Which are 3D Printed with the Same Amount of Filament.....	213-219
<b>Akşan HACIOĞLU, İhsan YILMAZ, Cem Bilgili USUNDAĞ (Derleme Makalesi/ Review Article)</b> 3D Printing for Tissue Engineering Applications.....	221-227
<b>Ahmet ÖZSOY, Mustafa GALİP (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Akışkan Taşıma Ü-Borusu Güneş Kolektörünün Güneş Similatöründeki Test Sonuçlarının Analizi Analysis of the Test Results on the Solar Simulator of the U-Pipe Evacuated Tube Solar Collector.....	229-236
<b>Sezer KARABULUT, Abdülhak ŞAHİNOĞLU (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> E260 Çekilmenin İşlenmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü, Güç Tüketimi ve Makine Gürültüsü Üzerine Etkileri Effect of the Cutting Parameters on Surface Roughness, Power Consumption and Machine Noise in Machining of R260 Steel.....	237-244
<b>Emine Öge KARACA (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> Yeni Schiff Bazı Bileşiklerin Sentezi ve Yapılarının Aydınlatılması Synthesis of New Schiff Base Compounds and Identification of Their Structures.....	245-249
<b>Hassan Barı ULAS (Araştırma Makalesi/ Research Article)</b> AISI D2 VE AISI D3 Sıgık İstikrarlı Çekilme Parametrelerinin Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi Investigation The Effects of Cutting Parameters on the Cutting Forces in Drilling AISI D2 and AISI D3 Cold Work Tool Steels.....	251-256

# Journal of Polytechnic

## POLİTEKNİK DERGİSİ

VOLUME / CILT 21 NUMBER / SAYI 1 MARCH / MART 2018

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ / POLİTEKNİK DERGİSİ**

GAZI UNVERSTY / JOURNAL OF POLYTECHNIC

<http://www.politeknik.gazi.edu.tr>**GAZİ ÜNİVERSİTESİ**

# Politeknik Dergisi

## Journal of Polytechnic

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

Yayın Yönetmeni / Publishing Manager  
**Prof. Dr. Adnan SÖZEN**  
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  
**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**, Aalborg University  
**Prof. Dr. Hacı Bayram KARADAĞ**, İnönü Üniversitesi  
**Prof. Dr. İhsan ALP**, Gazi Üniversitesi  
**Prof. Dr. Hilal KURT**, Gazi Üniversitesi  
**Prof. Dr. Murat HOŞÖZ**, Kocaeli Üniversitesi  
**Prof. Dr. Dilek KUMLUTAŞ**, Dokuz Eylül Üniversitesi  
**Prof. Dr. Zafer TEKİNER**, Gazi Üniversitesi  
**Prof. Dr. Hakan KESKİN**, Gazi Üniversitesi  
**Doç. Dr. Murat YÜCEL**, Gazi Üniversitesi  
**Doç. Dr. Bünyamin CİYLAN**, Gazi Üniversitesi  
**Doç. Dr. Mustafa ÖZER**, Gazi Üniversitesi  
**Doç. Dr. Ahmet DURGUTLU**, Gazi Üniversitesi  
**Doç. Dr. Hamit SOLMAZ**, Gazi Üniversitesi

### YAYIN DANIŞMA KURULU/EDITORIAL ADVISORY BOARD

<b>Abid ABU-TAIR</b> , Berzeit University	<b>M. Baki KARAMIŞ</b> , Erciyes Üniversitesi
<b>Adel NASİRİ</b> , University of Wisconsin Milwaukee	<b>Mahmood GHORANNEUISS</b> , Azad University
<b>Alper BÜYÜKKARAGÖZ</b> , Gazi Üniversitesi	<b>Metin GÜRÜ</b> , Gazi Üniversitesi
<b>Arcan DERECİOĞLU</b> , Orta Doğu Teknik Üniversitesi	<b>Metin İPEK</b> , Sakarya Üniversitesi
<b>Arif WANI</b> , California State University	<b>Mustafa AKTAŞ</b> , Gazi Üniversitesi
<b>Ayhan ÖZÇİFTİ</b> , Aksaray Üniversitesi	<b>Myung Hyun KİM</b> , Kyung Hee University
<b>Bekir Sami YILBAŞ</b> , King Fahd University	<b>Nadire Şule ATILGAN</b> , Hacettepe Üniversitesi
<b>Cevdet SÖĞÜTLÜ</b> , Gazi Üniversitesi	<b>Nizamettin KAHRAMAN</b> , Karabük Üniversitesi
<b>Engin ÖZDEMİR</b> , Kocaeli Üniversitesi	<b>Nobumasa Matsui</b> , Nagasaki University
<b>Erol ARCAKLIOĞLU</b> , Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi	<b>Nusret AS</b> , İstanbul Üniversitesi
<b>Farzollah MIRZAPOUR</b> , University of Zanjan	<b>Osman ISIKAN</b> , Marmara Üniversitesi
<b>Hakan YAVUZ</b> , Çukurova Üniversitesi	<b>Peter LUND</b> , Helsinki University of Technology
<b>Halit KARABULUT</b> , Gazi Üniversitesi	<b>Ramazan BAYINDIR</b> , Gazi Üniversitesi
<b>Hamit SARUHAN</b> , Düzce Üniversitesi	<b>Ramazan KURT</b> , Bursa Teknik 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>Rodica MILICI</b> , Stefan cel Mare Suceava University
<b>Hüseyin Rıza BÖRKLÜ</b> , Gazi Üniversitesi	<b>Saffa B. RIFFAT</b> , Nottingham University
<b>İbrahim DİNÇER</b> , University of Ontario, Institute of Technology	<b>Sare SAHİL</b> , Gazi Üniversitesi
<b>İbrahim SEFA</b> , Gazi Üniversitesi	<b>Saw Sor HEOH</b> , INTI International University
<b>İhsan KORKUT</b> , Gazi Üniversitesi	<b>Sing LEE</b> , Institute for Plasma Focus
<b>İlhami ÇOLAK</b> , İstanbul Gelişim Üniversitesi	<b>Souad A.M.ALBATHI</b> , International Islamic University of Malaysia
<b>İlker USTA</b> , Hacettepe Üniversitesi	<b>Tayfun MENLİK</b> , Gazi Üniversitesi
<b>İshak KARAKAYA</b> , Orta Doğu Teknik Üniversitesi	<b>Turgay AKBULUT</b> , İstanbul Üniversitesi
<b>Jamal KHATIB</b> , University of Wolverhampton	<b>Ulvi ŞEKER</b> , Gazi Üniversitesi
<b>Jerzy Smardzewski</b> , Ponzan University	<b>Yılmaz ARUNTAŞ</b> , Gazi Üniversitesi
<b>John KINUTHIA</b> , University of South Wales	

<b>Cilt /volume : 21</b>	<b>Sayı / number : 1</b>	<b>Mart/ March : 2018</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 21 SAYI 1) KATKI VEREN HAKEMLER</b>	
Abdullah KURT	İbrahim ATILGAN
Abdurrahman ASAN	İbrahim ÇİFTÇİ (2 kez)
Adem ACIR (3 kez)	İbrahim KARAAGAÇ
Adnan AKKURT (2 kez)	İbrahim TUKENMEZ
Adnan SÖZEN	İlhami DEMİR (2 kez)
Ahmet Alper ONER	İsmail ÖZDEMİR
Ahmet BEYÇIOĞLU	M. Tolga ÖZKAN (2 kez)
Ahmet BİLGİL	Mehmet EZAN
Ahmet KILIÇ	Metin GÜRÜ
Ahmet ÖZDEMİR	Murat YİĞİT
Ahmet PİNAR	Mustafa AKTAŞ (2 kez)
Ahmet TAŞKESEN	Mustafa AKTAŞ
Aslı ÖZÇEVİK	Mustafa DEMİRCİ
Beşir DANDIL	Mustafa İLBAŞ (3 kez)
Çetin KARATAŞ	Nazmiye YAHNIOĞLU
Durmuş BİRCAN	Necdet ÖZBALTA
Erol KURT	Nihat ÖZTURK
Eylül DEMİR	Osman ŞİMŞEK
Fatih KORKMAZ	Özgür EROL
Feyyaz DURAP	Ramazan BAYINDIR
Gökhan DURMUŞ (2 kez)	Salih YAZICIOĞLU (3 kez)
H. Mehmet ŞAHİN	Serhat KARYEYEN
Hakan DİLİPAK	Sevtap Yılmaz DEMİRKALE
Halil DEMİR (2 kez)	Tayfun MENLİK
Hikmet Hüseyin ÇATAL	Ulaş CAYDAŞ
Hüseyin Ata KARAVANA	Yasin KIŞIOĞLU
Hüseyin BÖRKLÜ	Yunus KAYIR
İsmail TOPALOĞLU	Yusuf ŞAHİN

**Yazışma Adresi / Correspondence Address :**

Politeknik Dergisi Editörlüğü  
Gazi Üniversitesi  
Teknoloji Fakültesi  
Tanıtım ve Yayın Müdürlüğü  
06500 Teknikokullar  
ANKARA -TÜRKİYE

**Tel** : 0312-202 34 12

**Fax** : 0312-212 00 59

**Elektronik Posta Adresi / e-mail** : politeknik@gazi.edu.tr

Teknik Sorumlu / Technical Manager: **Erdem ÇİFTÇİ**

Dizgi / Compositor: **İdris ÖZÇELİK**

Baskı / Printing : Gazi Üniversitesi Matbaası / Printing Unit of Gazi University

**e - ISSN : 2147-9429**



# POLİTEKNİK DERGİSİ

## JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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

# Asenkron motorlarda rotor oluğunun farklı optimizasyon yöntemleri ile optimizasyonunun gerçekleştirilmesi ve performansa etkilerinin incelenmesi

## *Optimizing the rotor slot dimensions of asynchronous motor using different optimization methods and investigating effects on the motor performance*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Burak YENİPİNAR<sup>1</sup>, Cemal YILMAZ<sup>2</sup>, Yusuf SÖNMEZ<sup>3</sup>, Mehmet Fatih IŞIK<sup>4</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-5997-944X

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-2053-052X

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-9775-9835

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0003-3064-7131

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Yenipınar B., Yılmaz C., Sönmez Y. ve Işık M. F., “Asenkron motorlarda rotor oluğunun farklı optimizasyon yöntemleri ile optimizasyonunun gerçekleştirilmesi ve performansa etkilerinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 1-6, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.372682

# Asenkron Motorlarda Rotor Oluğunun Farklı Optimizasyon Yöntemleri ile Optimizasyonunun Gerçekleştirilmesi ve Performansa Etkilerinin İncelenmesi

Burak YENİPİNAR<sup>1</sup>, Cemal YILMAZ<sup>2</sup>, Yusuf SÖNMEZ<sup>3</sup>, Mehmet Fatih İŞİK<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Ankara

<sup>4</sup>Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Çorum

(Geliş/Received : 17.02.2017 ; Kabul/Accepted: 27.03.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada asenkron motorlarda optimal rotor oluk ölçülerinin, Sequential Nonlinear Programming (SNP), Genetik Algoritma (GA) ve Sequential Mixed Integer NonLinear Programming (SMINP) yöntemleri ile bulunması gerçekleştirilmiş ve karşılaştırmalı olarak motor performansına olan etkisi incelenmiştir. Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasındaki amaç maksimum motor veriminin sağlandığı oluk geometrisini elde etmektir. Simülasyon çalışmaları, Ansys Maxwell paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen optimizasyon çalışması sonrasında elde edilen rotor oluk geometrisine göre Ansys Maxwell 2D programında motor modeli oluşturulmuş ve gerekli analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en verimli motor geometrisi GA algoritması kullanıldığında elde edilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Asenkron motor tasarımı, rotor oluk optimizasyonu, sequential nonlinear programlama, genetik algoritma, sequential mixed integer nonlinear programlama.

## Optimizing the Rotor Slot Dimensions of Asynchronous Motor Using Different Optimization Methods and Investigating Effects on the Motor Performance

### ABSTRACT

In this paper, finding optimal rotor slot measurements in asynchronous motors has been realized by using optimization methods Sequential Nonlinear Programming (SNP), Genetic Algorithm (GA) and Sequential Mixed Integer Nonlinear Programming (SMINP) and effects of them on the motor performance have been investigated comparatively. The purpose of the work is to obtain the slot geometry that provides maximum motor efficiency. Simulation studies have been done by using Ansys Maxwell package programming. According to the rotor slot geometry obtained from simulation results, the motor model has been created in Ansys Maxwell 2D and required analyses of the motor have been realized. According to the results obtained, the most efficient rotor geometry has been occurred when using GA.

**Keywords:** Asynchronous motor design, Rotor slot optimization, sequential nonlinear programming, genetic algorithm, sequential mixed integer nonlinear programming

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Verimlilik noktasında, elektrik makinalarının tasarımı ve optimizasyonu çok büyük önem arz etmektedir. Tasarımın başlangıç noktası ne kadar doğru seçilir ise optimizasyon süreci de o kadar verimli ilerler ve nihai tasarım kalitesi de o derece yüksek olur.

Optimizasyon çalışmasında elde edilecek sonucun doğruluğunu test etmenin bir yöntemi de farklı optimizasyon yöntemlerinin karşılaştırılmasıdır.

Her ne kadar sürekli mıknatıslı motor teknolojisi gelişse de sincap kafesli asenkron motorlar sağlamlığı, basit yapısı ve düşük maliyeti sebebi ile sanayi sektöründe ciddi bir pazara sahiptir [1].

Dünya pazarındaki rekabetin ve elektrik enerjisi maliyetlerinin artması sebebi ile elektrik makinalarının optimizasyonuna olan ilgi yüksektir [2].

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

Ayrıca, enerji verimliliğinin gün geçtikçe önem kazandığı ülkemizde, sanayi elektrik tüketiminin yaklaşık %70'i üç fazlı AC indüksiyon elektrik motor sistemlerinde kullanılmaktadır [3]. Durum böyle iken pazar payını koruması için asenkron motorun performansını etkileyen her parametrenin optimizasyon çalışması büyük önem taşımaktadır.

Klasik asenkron motorların optimum tasarımı elektromanyetik tork açısından çelişkili olan iki gereksinime cevap vermek zorundadır. Bunlar yüksek kalkış momenti ve yüksek devrilme momentleridir. Bu momentler ise rotor oyuk geometrisine doğrudan bağlıdır [4-6].

Oluk yapılarının farklılığı, motorun kalkış, devrilme ve nominal işletmesindeki rotor direnç ve endüktans değerlerini, dolayısıyla moment değerlerini değiştirmektedir. Sincap kafesli asenkron motorun performansını belirleyen parametrelerin başında ise rotor direnci ve kaçak endüktans değerleri gelmektedir [7-8].

Sincap kafesli asenkron motorlarda rotor oluk optimizasyonu ile ilgili bazı çalışmalar yapılmıştır. Simon ve Monzon, SEY kullanarak üç fazlı sincap kafesli bir asenkron motoru analiz etmişlerdir. Çalışmalarında 5 farklı rotor oluk geometrisi kullanmışlardır ve bu rotor oluk geometrileri için parametrik model tanımlamalarını elde etmişlerdir [9].

Jang ve arkadaşları elektrikli araçlar için sincap kafesli asenkron motorun çift kafesli rotor oluk optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucu rotor oluğu derinleştirilmiş ve genişletilmiştir. Yeni oluk yapısı analiz edildiğinde ise momentte ve verimde yaklaşık olarak %1 iyileşme görülmüştür [10].

Sivaraju ve Devarajan, 2,2kW gücünde 3 fazlı bir asenkron motorda GA optimizasyon yöntemini kullanarak optimum güç faktörü elde etmeye çalışmıştır. Yapılan çalışmanın neticesinde verimde ve güç faktöründe iyileşmeler olduğu gözlemlenmiştir [11].

Fireteanu, Tudorache yüksek güçlü asenkron motorlarda optimum sincap kafesli rotor oluğu tasarımının ve bakır kısa devre çubuklarının kalkış torku, devrilme torku, verim ve güç faktörüne etkilerini incelemiştir [12].

Galindo yaptığı çalışmada rotor oluk geometrisinin akım ve momenti nasıl etkilediği beş farklı rotor oluk geometrisinde incelemiştir [13].

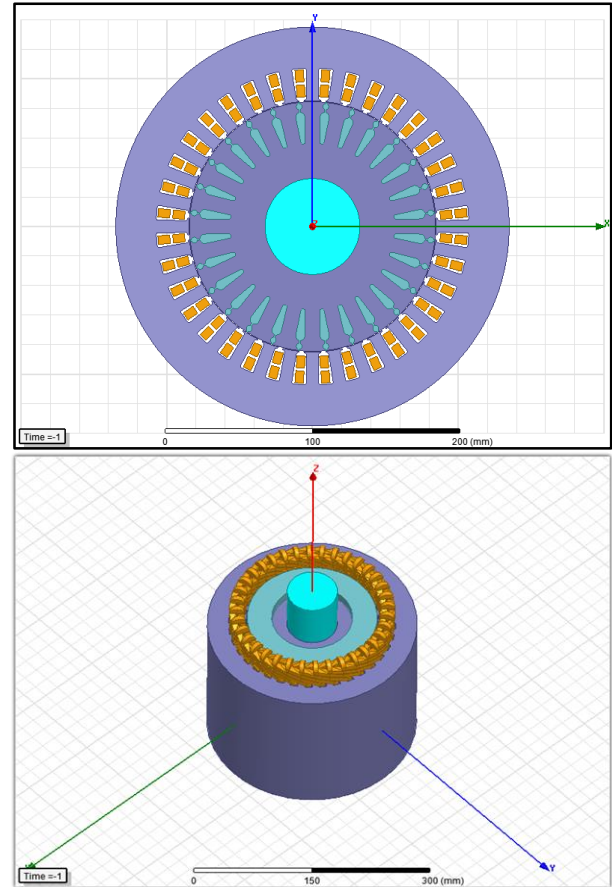
Bakır rotorlu asenkron motorlarda rotor iletim kayıpları düşüklüğü sebebiyle verimin daha yüksek olması ve kaymanın daha düşük olması sebebi ile daha avantajlı gibi görünse de yüksek maliyet ve bakır enjeksiyon işleminin zorluğu sebebi ile bu çalışmada alüminyum rotor çubukları üzerine çalışılmıştır.

Yapılan bu çalışmada, yalnızca rotor oluk ölçüleri optimize edilmiştir. Stator oluğu, motor iç ve dış çap, sargı sayıları, nüve uzunluğu vb. değerler değiştirilmemiştir. Double Cage Rotor oluk geometrisi SNP, GA ve SMINP optimizasyon teknikleri ile optimize edilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmalarında maksimum performans değerine ulaşılmaya çalışılmıştır.

Analizler Ansys Maxwell programında gerçekleştirilmiş ve her optimizasyon tekniğinde alınan optimum sonuçlar 2 boyutlu sonlu eleman analizine tabi tutularak incelenmiştir.

## 2. MOTOR MODELİ (MOTOR MODEL)

Optimizasyonu yapılacak motorun başlangıç rotor ölçülerine karşılık performans çıktıları ve simülasyon modelleri aşağıda yer almaktadır.



Şekil 1. Başlangıç değerlerindeki motorun 2D ve 3D Maxwell Modelleri (Initial values of motor 2D and 3D Maxwell Models)

Tablo 1. Motor Özellikleri (Motor specifications)

Parametre	Değer
Giriş Gerilimi	380 V
Çıkış Gücü	22 kW
Kutup Sayısı	4
Devir Sayısı	1466 rpm
Nominal Tork	143,2 Nm
Verim	% 89,2
Güç Katsayısı	0,82

Optimizasyon çalışması yapılacak 22kW gücündeki sincap kafesli asenkron motorun rotor oluk ölçüleri Tablo 2'de verilmiştir. Optimizasyon çalışmasında Tablo 2'de

ki değişkenler kullanılacak olup sonuçları karşılaştırılacaktır. Karar verilen optimum tasarımın FEA analizleri gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 2.** Optimizasyon Parametreleri (Optimization Parameters)

Parametreler	Optimizasyon Parametreleri		
	Başlangıç Değeri	Minimum Değer	Maksimum Değer
W1	4	2.174	5.985
W2	6.41	3.205	7.618
W3	3.17	2.155	4.755
H1	2	1	3
H2	16.75	8.375	20.45

### 3. OPTİMİZASYON SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRILMASI (OPTIMIZATION RESULTS AND COMPARISON)

Optimizasyon çalışması tamamlandıktan sonra, başlangıç ve optimize edilmiş parametreler Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 4'te optimizasyon sonucunda elde edilen performans değerleri verilmiştir. Optimizasyon çalışmasının sonucu incelendiğinde, her 3 optimizasyon çalışmasının sonucunun da başlangıç performans değerlerine göre iyileşmeler olduğu görülmüştür.

Tablo 3'te yer alan oluk boyutlarının değerleri birbirine yakın olmasına rağmen motor performansını önemli bir şekilde etkilediği gözlemlenmiştir.

Bir asenkron motorda maliyeti en az etkileyen malzemelerden birisi alüminyum maliyetidir. Rotor oluk alanında en fazla artış alan bazında GA ile elde edilen sonuçtur ki o da %14,8'dir. Fakat bu farkın toplam maliyete etkisi ise yok denecek kadar azdır.

S. Scott Crump tarafından icat edilen FDM baskı teknolojisinin patent koruma süresinin sona ermesi ile açık kaynak kodlu donanım ve yazılım kullanımı yaygınlaşmıştır [19]. Açık kaynak kod geliştirici topluluklar oluşarak, 3b baskı teknolojilerinin açık ve anlaşılır hâle getirilmesi sağlanılmıştır [1]. RepRap (Replicating Rapid-prototyper), insanlara pek çok 3b yazıcıyı açık kaynak kodlu donanım hâlinde sunan ve günümüzde de giderek yaygınlaşan en büyük açık kaynak kodlu projelerden birisidir. Bu proje, araştırmacılara kişiselleştirilmiş 3b yazıcı tasarımı ve üretimi imkânı sağlamaktadır [1].

MendelMax (MM) Maxbots tarafından 2011'in Kasım ayında tasarlanan açık kaynak kodlu bir RepRap 3b yazıcı

cısıdır [1]. Şase bileşenleri olarak ucuz alüminyum ekstrüzyon ve basılı destekler kullanılmaktadır [1]. Bileşenleri dünya genelinde çeşitli tedarikçilerden sağlanabilmektedir. MM 1.5, MM 3b yazıcısının iyileştirilmiş bir versiyonudur.

**Tablo 3.** Optimizasyon Sonucunda Elde Edilen Değerler (Values Obtained as a Result of Optimization)

Parametre	Başlangıç Değerleri	SNP	GA	SMINP
W1	4	5,781177	5,927407	4
W2	6.41	6,781854	6,189633	7
W3	3.17	3,1521	1,684759	3
H1	2	1,384512	1,131383	1
H2	16.75	15,74411	22,11145	19
Rotor Oluk Alanı (mm <sup>2</sup> )	115,56	128,45	132,65	131,97

Asenkron motorlarda kalkış akımı, motorun nominal akımının 7-8 katı kadar yüksek olabilirken; kalkınma momentinin, nominal momente oranı ise en az 2 civarında olması gerekmektedir.

SNP Optimizasyon yöntemi sonucunda elde edilen sonuçlar incelendiğinde motor veriminin, kalkış moment ve akımının arttığı, buna karşılık güç faktöründe bir miktar azalma olduğu gözlemlenmiştir.

GA optimizasyon yöntemi sonucunda ise göze çarpan en önemli sonuç verimde meydana gelen iyileşmedir. Buna karşılık güç faktörü ve kaymanın (s) az bir miktar azaldığı görülmektedir. Rotor oluk alanının %14,8 artmasına karşılık verim; %0,07 oranında bir artış göstermektedir. SMINP optimizasyon yöntemine göre gerçekleştirilen ve elde edilen parametrelere göre yapılan analiz sonucunda ise GA ile elde edilen sonuçlara paralel sonuçlar elde edilmiştir lakin GA ile elde edilen verim ve güç faktörü SMINP ile elde edilen sonuçlara göre daha yüksektir.

**Tablo 4.** Optimizasyon Sonucunda Performans Değerleri (Performance Values as a Result of Optimization)

Parametre	Başlangıç Değerleri	SNP	SMINP	GA
Verim	%89,2	%89,32	%89,35	%89,39
Güç Katsayısı	0,820	0.813	0.81	0.816
Nominal Hız	1466	1469	1470	1470
Nominal Tork (Rpm)	143.2	143	142,9	142,9
Kalkınma Torku (Nm)	283,1	324,9	312,6	317,9
Kalkınma Akımı (A)	186,5	217	221	216

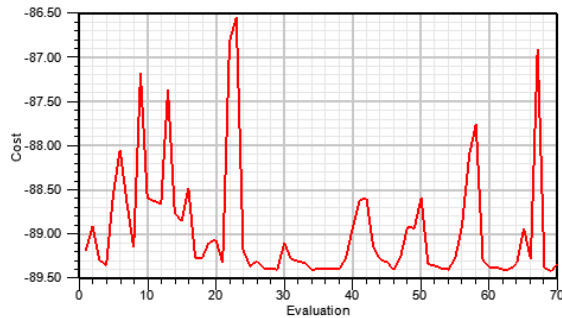
Tablo 5’de Rotor Akı Yoğunluğu değerleri verilmiş olup bu değerler incelendiğinde GA ile elde edilen parametrelere göre analizi gerçekleştirilen sincap kafesli asenkron motorun rotor akı yoğunluğu parametrelerinin gerek başlangıç durumu gerekse de diğer optimizasyon yöntemleri neticesinde elde edilen değerlerden daha yüksek olsa da nüve doyuma gitmediğinden dolayı akı yoğunluk değerleri uygun kabul edilebilecek seviyededir.

GA ile yapılan optimizasyon sonucunda rotor sırt bölgesindeki akı yoğunluğunun artmasının sebebi, rotor oluşu derinleştiği için rotor sırt alanı küçülmüştür ki bu sebep ile o bölgedeki akı yoğunluğu artış göstermektedir.

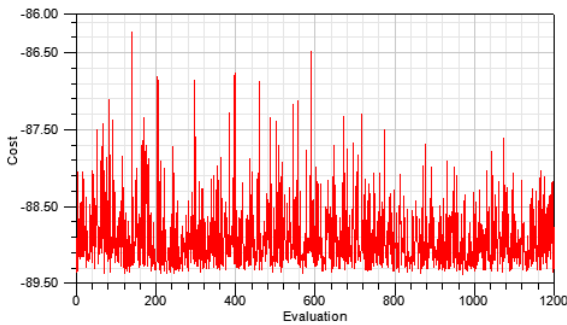
**Tablo 2.** Rotor Akı Yoğunluğu (Rotor Flux Intensity)

Parametre	Başlangıç Değerleri	SNP	GA	SMINP
Rotor Dışı Akı Yoğunluğu	1.19699	1,38322	1,40344	1,18887
Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu	0.75086	0,764149	1,52908	0,780161

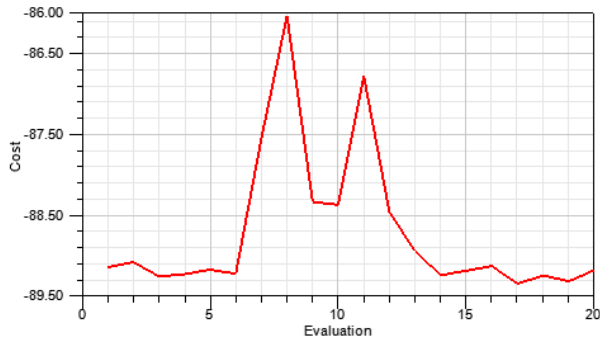
Şekil 2, 3 ve 4’te gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında, optimizasyon yöntemine karşılık iterasyon sayıları ve sonuca ne kadar yaklaştıkları yer almaktadır.



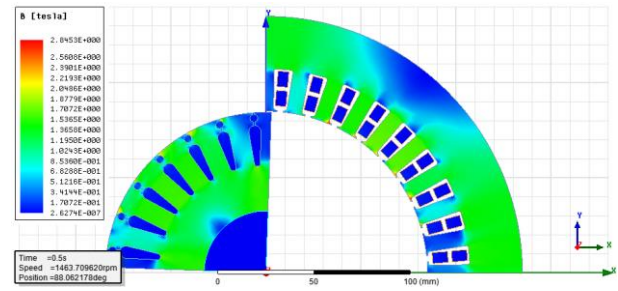
Şekil 2. SNP İterasyon (SNP İteration)



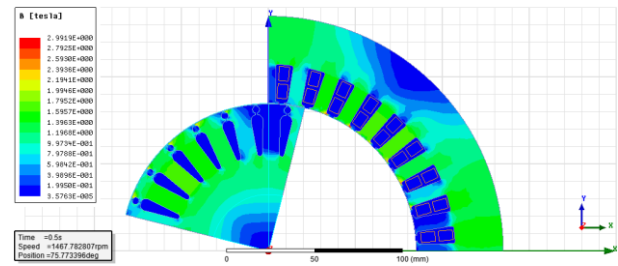
Şekil 3. GA İterasyon (GA İteration)



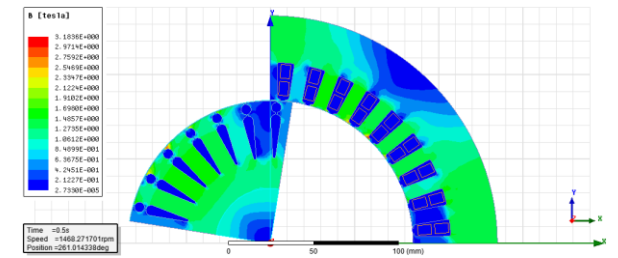
Şekil 4. SMINP İterasyon (SMINP İteration)



Şekil 5. Başlangıç Değerlerinde 0.5 ms Manyetik Akı Yoğunluğu (0.5 ms at initial values Magnetic Flux Density)

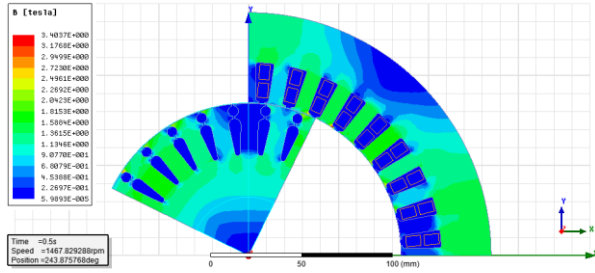


Şekil 6. SMINP 0.5 ms Manyetik Akı Yoğunluğu (SMINP 0.5 ms Magnetic Flux Density)



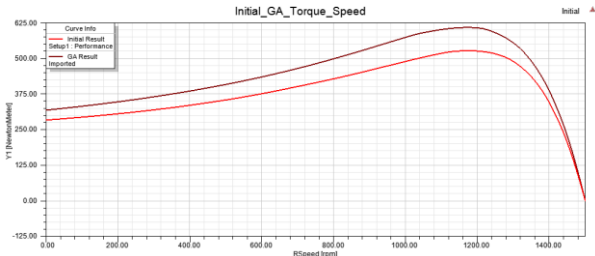
Şekil 7. GA 0.5 ms Manyetik Akı Yoğunluğu (GA 0.5 ms Magnetic Flux Density)



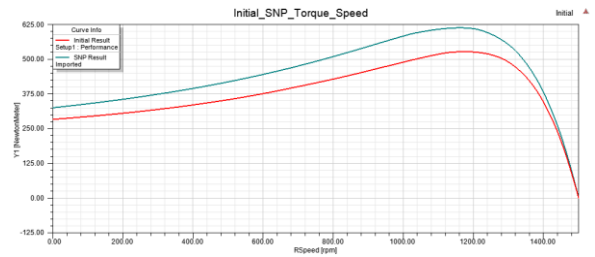


Şekil 8. SNP 0.5 ms Manyetik Akı Yoğunluğu (SNP 0.5 ms Magnetic Flux Density)

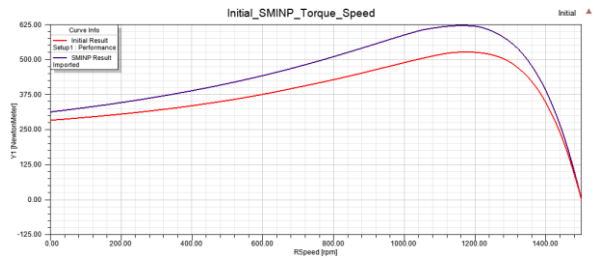
Şekil 9, 10 ve 11'de başlangıç parametrelerindeki Tork-Hız grafiğine karşılık gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen değerlere göre elde edilen Tork-Hız grafikleri yer almaktadır. Her 3 optimizasyon yöntemine göre de Tork-Hız karakteristiği başlangıç kabul edilen motordan daha iyi olduğu görülmektedir. Gerek kalkış ve devrilme momentlerinin yüksek olması gerekse de kaymanın (s) daha küçük olması bunun bir göstergesidir.



Şekil 9. Başlangıç ve GA Tork-Hız Eğrisi (Start and GA Torque-Speed Curve)



Şekil 10. Başlangıç ve SNP Tork-Hız Eğrisi (Start and SNP Torque-Speed Curve)



Şekil 11. Başlangıç ve SMINP Tork-Hız Eğrisi (Start and SMINP Torque-Speed Curve)

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada rotor oluk geometrisindeki meydana gelen değişikliklerin motor performansına etkileri incelenmiştir.

Uygulanan 3 ayrı optimizasyon (GA, SNP, SMINP) yönteminde de ana amaç maksimum verime ulaşmak olduğundan dolayı diğer performans değerlerinde kabul edilebilecek miktarlarda düşüş olmuştur. Örneğin, güç faktöründeki bu düşüş kabul edilebilir bir seviyede olduğundan dolayı optimizasyon parametrelerinde bir değişiklik yapılmamıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmada farklı rotor oluk geometrisine sahip 3 analizde de başlangıç değerinden daha yüksek bir verim elde edilmiştir. Güç faktörü, kayma, kalkış akımı ve torku ise her 3 optimizasyon tekniği ile elde edilen sonuçta da kabul edilebilir bir düzeydedir.

Analitik analiz sonuçlarının haricinde 2 boyutlu sonlu eleman analiz sonuçları doğrultusunda akı yoğunlukları ve kalkış performansı incelendiğinde GA optimizasyon yöntemi ile elde edilen sonuçların bu çalışma için en optimum değerler olduğu görülmektedir.

#### KAYNAKLAR (RESOURCES)

- [1] Çunkas, M., Akkaya, R., "Design optimization of induction motor by genetic algorithm and comparison with existing motor", *Mathematical and Computational Applications*, 11(3): 193-203, 2006.
- [2] Kadhim, H. H., "Technical and Economic Design of Three Phase Induction motor Using The Multicriterion Optimization Method", *Journal of Babylon University, Engineering Sciences*, 1(22): 2014.
- [3] [www.eie.gov.tr/verimlilik/document/Elektrik\\_Motorlari.pdf](http://www.eie.gov.tr/verimlilik/document/Elektrik_Motorlari.pdf), Erişim: 08.06.2016, 12:05
- [4] Brojboiu, M., "Concerning the influence of the rotor bar geometry on the induction motor performances", Proc. of *5th TELSIKS'01 International Conference*, Sept. 2001.
- [5] Kirtley, J. L., "Designing Squirrel Cage Rotor Slots with High Conductivity", *Proc. of ICEM'04 Conference*, Sept. 2004.
- [6] Turcanu, O.A., Tudorache, T., Fireteanu, V., "Influence of squirrel-cage bar cross-section geometry on induction motor performances", *Proc. Of SPEEDAM'06*, May 2006.
- [7] Şal, S., İmeryüz, M., Ergene, L. T., "The Analysis of The Squirrel Cage Induction Motor Rotor Bars under the Cost Constraint", *EMO Bilimsel Dergi*, 2(3): 23 - 28, 2012.
- [8] Ünlükaya, E., Yetkin, A. G., Çanakoğlu, A. İ., Turan, M., "Rotor Oluk Şekillerinin Asenkron Motor Performansına Etkileri", *Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, 27 – 29 Kasım 2014.
- [9] Simon, L. ve Monzon, J. M., "The Finite Element Method for Parametric Identification of a Three – Phase Induction Machine with Genetic Algorithms", *11th Spanish Portuguese Conference on Electrical Engineering*, 2009.

- [10] Jang, S., Jeon, K-W., Kim, Y-J., Jung, S-Y., "Numerical Analysis and Optimal Design of Double Squirrel Cage Induction Motor for Electric Vehicle" School of Electronic and Electrical Engineering, Sungkyunkwan Univeristy, Kore. 2013.
- [11] Sivaraju, S.S., Devarajan, N., "GA based optimal design of three phase squirrel cage induction motor for enhancing performance" , *International Journal of Advanced Engineering Technology*– E-ISSN 0976-3945
- [12] Fireteanu, V., Tudorache, T., Turcanu, O.A., "Optimal Design of Rotor Slot Geometry of Squirrel-Cage Type Induction Motors", *Electric Machines & Drives Conference*,1: 537-542, May 2007.
- [13] Galindo, V. A., Fdez, X. M. L., Pinto, D. J. A., Coimbra, A. P., "Parametric Study of Rotor Slot Shape on a Cage Induction Motor", *10th International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering*, 190 – 195, 2002.



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

## Sialon- $\text{Si}_3\text{N}_4$ esaslı seramik kesici uçların ısı iletkenliğinin incelenmesi

### *Investigation of thermal conductivity of ceramic cuttin edge based Sialon- $\text{Si}_3\text{N}_4$*

Yazar(lar) (Author(s)): Battal DOĞAN<sup>1</sup>, Hüsamettin TAN<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-5542-4853

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-2576-8166

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article):** Doğan B. ve Tan H.,“ Sialon-  $\text{Si}_3\text{N}_4$  esaslı seramik kesici uçların ısı iletkenliğinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 7-12, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.389237

# Sialon- Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Esaslı Seramik Kesici Uçların Isıl İletkenliğinin İncelenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Battal DOĞAN<sup>1\*</sup>, Hüsamettin TAN<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, Raylı Toplu Taşıma Dairesi Başkanlığı, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Kırıkkale Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 20.07.2016 ; Kabul/Accepted : 19.11.2017)

## ÖZ

Demir esaslı veya demir dışı metal ürünlerin yüksek hızlarda işlenerek üretilmesinde kullanılan kesici uçlar ileri teknoloji seramik ürünlerden elde edilmektedir. Çalışmada Kennametal firması tarafından üretilen ve kesici takım olarak kullanılan saf silisyum nitrid (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) esaslı KY3500 model ve Sialon esaslı KY 2000 model iki farklı ucun ısıl iletkenliği deneysel ve sayısal olarak belirlenmiştir. Deneysel olarak yapılan çalışmalarda sıvı ile yer değişim yöntemi ile yoğunluk ( $\rho$ ), diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) sistemi kullanılarak özgül ısı ( $c$ ) ve zamana bağlı ısı iletimi esasına dayanan Laser Flash teknolojisi ile ısıl yayılım katsayısı ( $\alpha$ ) ölçümü yapılmıştır. Yapılan ölçümlerden malzemenin efektif ısıl iletkenlik değeri ( $k=\alpha.\rho.c$ ) ifadesinden bulunmuştur. Sayısal çalışmada ilk önce kesici uçların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (SEM) alınmıştır. Bu görüntüler Autocad programı kullanılarak sonlu eleman esaslı bir yazılım olan Ansys için hazır hale getirilmiştir. Ansys'te iki boyutlu ve sabit yüzey sıcaklığı sınır şartları altında efektif ısıl iletkenlik hesaplanmıştır. Çalışmada SEM görüntüleri ve Element Analizi (EDS) sonuçlarını kullanarak kesici uçların ısıl iletkenliği esasına dayanan yeni bir sayısal metod kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Isıl iletkenlik, kesici uç, sialon, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

## Investigation of Thermal Conductivity of Ceramic Cuttin Edge Based Sialon- Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

### ABSTRACT

High speed processing of ferrous or non-ferrous metal products used cutting edge can be produced from high-tech ceramics. Used as a cutting tool in the study Sialon(KY 2000) and silicon nitride(KY3500) (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) based thermal conductivity of the two corners are determined experimentally and numerically. Studies conducted in experimental density by liquid displacement method ( $\rho$ ) measurement, differential scanning calorimetry (DSC) using system specific heat ( $c$ ) measurement and Laser using Flash technology thermal diffusivity coefficient ( $\alpha$ ) measurements were performed. Experimental measurement of the effective thermal conductivity of the material ( $k=\alpha.\rho.c$ ) is found from the expression. For numerical solution scanning electron microscope images (SEM) was used. These images using AutoCAD software finite element based software that has been made ready for Ansys. Ansys two -dimensional and effective thermal conductivity calculated at constant surface temperature boundary conditions. A new numerical method based on the thermal conductivity principle of the inserts was used in the study using SEM images and Element Analysis (EDS) results.

**Keywords:** Thermal conductivity, cutting edge, sialon, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Talaşlı imalatta kesici takımların yüksek kesme hızlarında uzun sürelerde kullanılması amacıyla 1930'lu yılların başlarından itibaren seramik kesiciler kullanılmaktadır. Günümüzde imalatın yüksek kesme parametreleriyle yapılması nedeniyle seramik kesiciler seri imalat yapılan sektörlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. İmalat sektöründe kesme hızının artırılması kesicinin kullanılma süresini doğrudan etkilemektedir [1]. Tezgâhlarda yüksek kesme hızları kesici ile talaş yüzeyi arasındaki sıcaklığı artırmaktadır. Bu durum yüksek sıcaklıklarda ısıl şoklara karşı dirençli kesici takımları gerektirmektedir. Seramik kesiciler sıcaklığın aşırı

yükseldiği durumlarda sertliklerini koruyabilen ve yüksek hızlara dayanıklı takımlardır.

Seramik kesiciler değişik oranlarda karıştırılan tozların basınç altında sinterlenmesi ile elde edilen kompozit malzemelerdir. Yüksek kesme hızlarında iyi performans gösteren seramik kesici uçlar ile çalışmak işleme zamanını azaltır [1]. İşlem yapılan parçalarda dar toleranslarla çalışma yapılabilir [2]. Seramik kesici uçlarla yapılan işlemlerde daha düzgün yüzeyler elde edilir. Ancak kırılmaya eğilimlidirler ve üretim maliyetleri yüksektir. Bu uçların kullanıldıkları tezgâhların titreşiminin az olması gerekmektedir[3].

Son yıllarda imalat sektöründe silisyum nitrid ve Sialon esaslı seramik kesici uçlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Sialon silisyum nitrid ve alüminyum oksidin bir araya gelmesiyle oluşan bir seramik türüdür. Sialon esaslı

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

kesiciler yüksek aşınma dayanımı nedeniyle yüzey kalitesi gerektiren işlemlerde çok iyi sonuç verirler[4]. Silisyum nitrür esaslı seramik uçlar ısı şoklara direnci ve sünekliliği nedeniyle sialon esaslı seramiklere göre üstünlükleri olan malzemelerdir. Bu malzemeler yüksek sıcaklıklarda sertliklerini korurlar ve sünektirler.

Seramik kesici uçların ısı özelliklerini en iyi ifade eden özellik ısı iletkenliktir. Bu uçlarda efektif ısı iletkenlik katkı malzemelerinin ısı iletkenliklerine, hacimsel oranlarına ve geometrik şekillerine bağlıdır. Seramik kesici uçların ısı iletkenliğini içerisinde yer alan katkı malzemelerinin oranlarına bağlı olarak en fazla mikro yapıları etkilemektedir [5]. Kesici uçların mikro yapılarında yapılacak modifikasyonlarla ısı iletkenlik değeri kontrol altında tutulabilir.

Düzgün dağılımlı mikro yapıya sahip kesici uçlar için Eş. (1)'de verilen teorik ifade kullanılarak ısı iletkenlik bulunabilir. Ancak düzgün dağılımı olmayan uçların efektif ısı iletkenliği sadece bir doğrultuda bulmak mümkün değildir. Bu nedenle ısı iletkenlik genellikle deneysel ölçümlere dayanmaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial x} (kA \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (kA \frac{\partial T}{\partial y}) = 0 \quad (1)$$

Literatürde kesici uçların mekanik davranışlarını inceleyen çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen ısı özelliklerinin araştırmaları sınırlıdır. Kesici uçların ısı iletkenliğini tahmin etmek için yalnızca özel geometrielerde kullanılacak çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada SEM görüntüleri kullanarak ısı iletkenliğinin sayısal olarak hesaplanmasına dayanan yeni bir metot geliştirilmiştir. Kesici uç prototipinin üretimi gerçekleştirilmeden önce katkı oranlarının belirlenerek ısı iletkenliğinin tahmin edilmesi üretim süreçlerini ve maliyetlerini düşürecektir. Son yıllarda bilgisayar destekli tasarım sistemlerinin gelişmesi çalışmada geliştirilen metodun kullanımını kolaylaştırmaktadır. Çalışmanın sonunda mikro yapı görüntüleri kullanılarak katkı oranlarının belirlenmesi ilkesine dayanan sayısal çözümlerin deneysel ölçümlere yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

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

Kırıkkale Üniversitesi Makine ve Malzeme laboratuvarlarında yoğunluk, ısı yayılım katsayısı ve özgül ısı ölçülerek malzemenin bütünü temsil eden efektif ısı iletkenlik değeri deneysel olarak belirlenmiştir. Çalışmada Kennemetal firması tarafından üretilen ve çizelge 1'de verilen sialon ve saf silisyum nitrür esaslı kesici uç numuneleri kullanılmıştır.

**Çizelge 1.** Numuneler ve Özellikleri (Samples and Features)

Kesici Uç No	Katalog Numarası	Uç Özelliği
KY2000	SNGN120408	Sialon
KY3500	SNGN120408	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>

Deneysel çalışmaların ilk aşamasında Perkin Elmer marka Diamond DSC cihazı ile element analizleri (EDS)

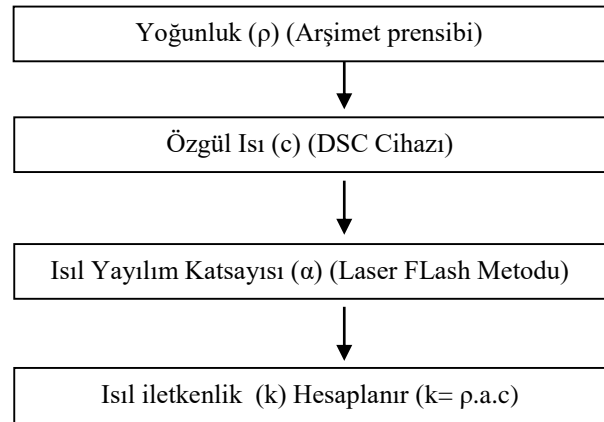
yapılmıştır. Element analizi yapılırken cihaz tarafından numunelere maksimum 20 kV'luk enerji verilmiştir. Bu enerjinin verilmesinden sonra numuneden yansıyan elektronlardan çizelge 2'de verilen her iki ucun kimyasal bileşiminde yer alan elementler görülmüştür.

**Çizelge 2.** Element analizi sonuçları (Element analysis results)

Element	KY2000	KY3500
	Bulunma oranı (%)	Bulunma oranı (%)
Karbon (C)	0	0
Azot (N)	0,005	18,24
Oksijen (O)	0,006	0
Alüminyum (Al)	9,265	0
Silisyum (Si)	90,724	81,76

Numunelerin ısı iletkenliğinin belirlenebilmesi için özgül ısı, yoğunluk ve ısı yayılım katsayısının ölçülmesi gerekir. Ölçme yönteminin seçimi; elde edilecek ısı iletkenlik değerinin büyüklüğüne, çalışılan sıcaklık aralığına ve numune boyutlarına bağlıdır. Çalışmada deneysel olarak ısı iletkenlik tayin edilirken Şekil 1'deki akış şeması kullanılır.

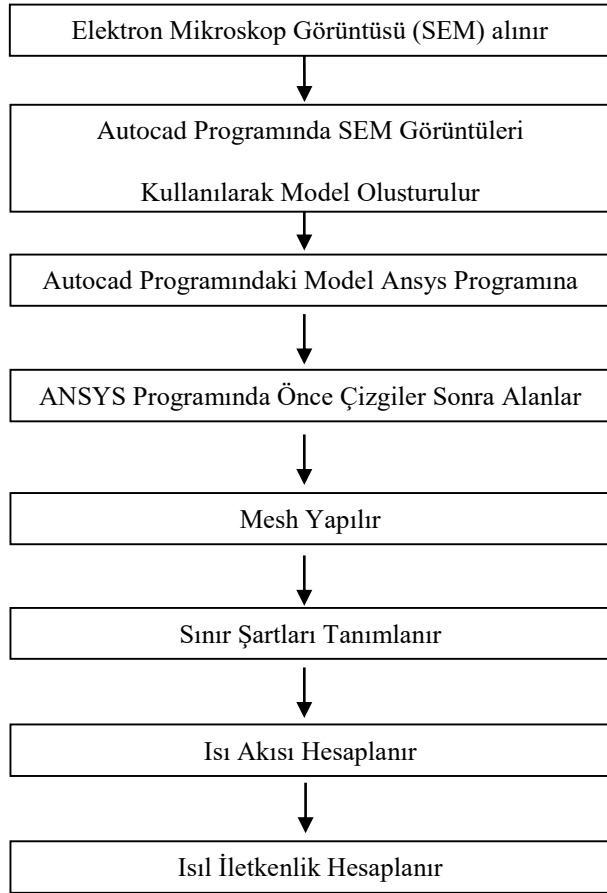
Çalışmada numunelerin yoğunluk ölçümlerinde Arşimet'in su ile yer değiştirme prensibine göre çalışan Ultracycrometer marka 1000P model cihaz kullanılmıştır. Kesici uçların özgül ısı ölçmek için EDS analizinde kullanılan diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazı tercih edilmiştir. Numuneler homojen ince toz haline getirildikten sonra küçük bir kaba yerleştirilip referans numune ile sıcaklık farklılıkları ölçülerek özgül ısı belirlenmiştir. Isı yayılım katsayısı ölçümünde laser flash metodu çok popüler bir yöntemdir. Bu metotta ölçüm sonuçlarında doğruluk ve hassasiyet oldukça iyidir. Çalışmada **Anter / Flasline 2000** model cihaz ile sıcaklığın belirli bir mesafeye kadar yayılması için geçen zaman ölçülmüş ve ısı yayılım katsayısı belirlenmiştir.



**Şekil 1.** Deneysel çalışma akış şeması (Experimental study flowchart)

### 3. SAYISAL ÇÖZÜMLER (NUMERICAL SOLUTION)

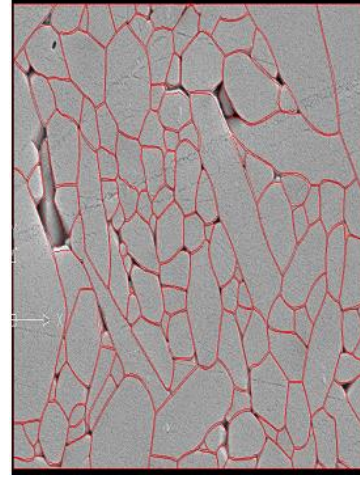
Isı transferinde birçok problemin çözümünde sayısal metotlarla çok başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Sonlu elemanlar ve sonlu farklar metodu sayısal çözümlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Isı iletimi problemlerinde çözüm alanında farklı sınır şartları kullanılarak değişik noktalarda sıcaklık veya ısı akısı sayısal olarak hesaplanabilir. Bu sıcaklık ve akı değerleri kullanılarak istenen özellik bulunur. Bu çalışmada Şekil 2'de verilen akış şeması kullanılarak kesici uçların efektif ısı iletkenlik iki boyutlu olarak hesaplanmıştır.



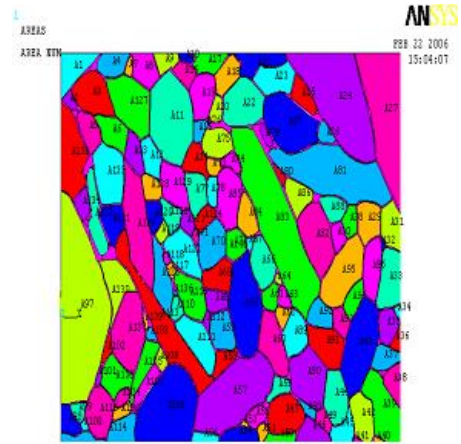
Şekil 2. Sayısal hesaplama akış şeması (Numerical computation flowchart)

Çalışmada sayısal modelleme yapılırken SEM görüntülerinden yararlanılmıştır. Elektron mikroskopla elde edilen SEM görüntülerinin sonlu eleman esaslı bir programla modellenmesi yapılmış, uç mikro yapısına bağlı olarak her element için farklı ısı iletkenlik değeri kullanılmıştır. Kesici uçlar için EDS analizinden elde edilen oranlar ve SEM görüntüleri kullanılarak karma malzemenin bütününe ifade eden efektif ısı iletkenlik değeri hesaplanmıştır. Sayısal analiz yapılırken SEM görüntüleri Autocad programında (şekil 5.a) düzenlenerek ANSYS programına aktarılmaktadır. Ansys programında Şekil (5.b)'deki gibi alanlar elde edilir. Alanlara ait malzeme ısı özellikleri EDS

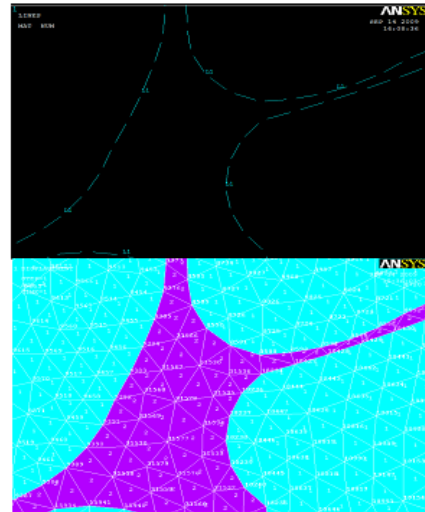
analizinden elde edilen oranlar kullanılarak tanımlanır. Çalışmada Ansys programına malzeme özellikleri tanımlanırken ısı iletkenlik değerleri sıcaklığa bağlı olarak kullanılmıştır. Programda şekil (5.c)'deki gibi mesh yapılır. Mesh işleminde belirli bölgelerde farklı büyüklükler seçilmiştir.



a) Autocad Programındaki Çizgiler



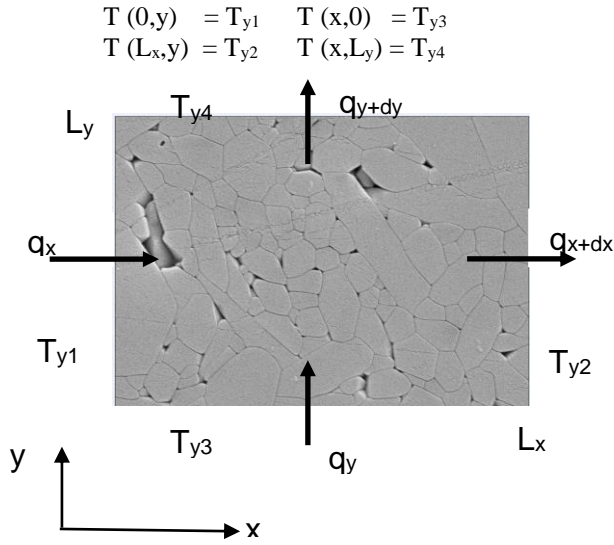
b) Ansys Programındaki Alanlar



c) Mesh

Şekil 3. Sayısal çözümlerin gösterimi (Representation of numerical solution)

Mesh işlemi tamamlandıktan sonra Şekil 4’de verilen sabit yüzey sınır şartları Ansys programında kullanılmaktadır.



Şekil 4. Sayısal çözüm için sınır şartları

Sınır şartlarının tanımlanmasından aşaması bittikten sonra programda çözümler yapılmıştır. Her doğrultuda düğüm noktalarında ısı akısı değeri bulunmuştur. Düğüm noktalarındaki ısı akıları belirlendikten sonra Eş.(2)’deki Fourierin ısı iletimi yasası (x) ve (y) doğrultusu için yazılarak ısıl iletkenlik elde edilmiştir.

$$q_n = -k_n \frac{\partial T}{\partial n} \quad (\text{W/m}^2) \quad (2)$$

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI (RESEARCH FINDINGS)

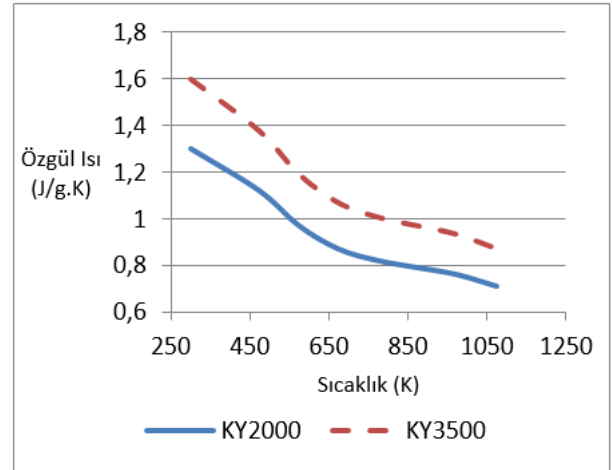
##### 4.1 Deneysel Ölçümlerden Elde Edilen Bulgular (The Findings From Experimental Measurements)

Çalışmada deneysel çalışmalardan yoğunluk, özgül ısı ve ısıl yayılım katsayısı ölçülmüştür. Arşimet prensibine göre yapılan yoğunluk ölçümlerinden elde edilen sonuçlar çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 3. Yoğunluk ölçümleri ( Density measurements)

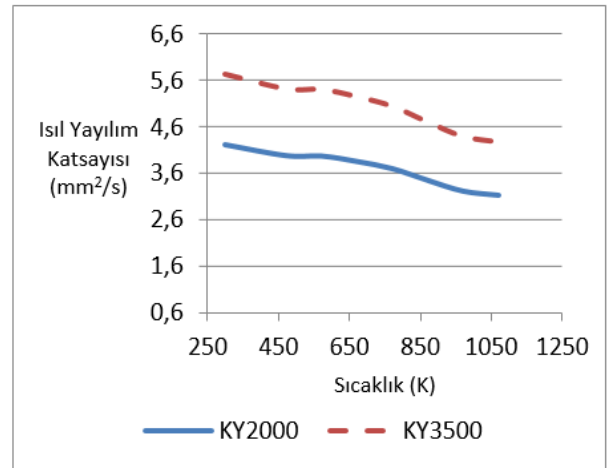
No	Yoğunluk Ölçüm Değeri (g/cm <sup>3</sup> )	Uç Özelliği
KY 2000	3,37	Sialon
KY 3500	3,29	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>

Çalışmada kesici uçlar için sıcaklığa bağlı özgül ısı değerleri Şekil 5’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde 600K sıcaklıklara kadar özgül ısı değerlerinde keskin bir düşüş olduğu görülmektedir.



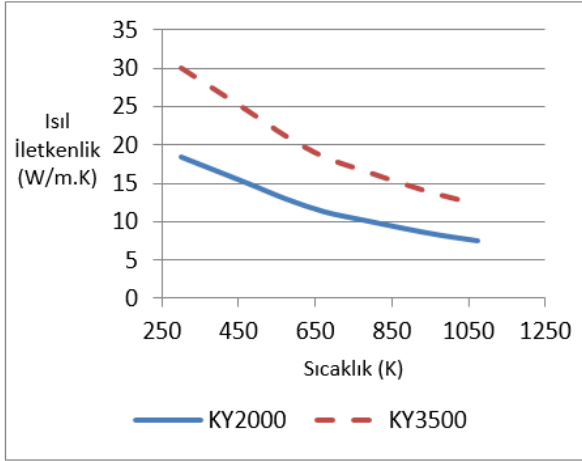
Şekil 5. Özgül ısının sıcaklıkla değişimi (Specific heat of temperature changes)

Seramik kesici uçlar için laser flash metodu kullanılarak ısıl yayılım katsayısı ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 6’da verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde ısıl yayılım katsayısının sıcaklıkla azaldığı görülmektedir. Sıcaklık değeri 1000 K geçtikten sonra ısıl yayılım katsayısı fazla değişmemektedir.



Şekil 6. Isıl yayılım katsayısının sıcaklıkla değişimi (Coefficient of thermal diffusion changes in temperature)

Deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak  $k = \rho \cdot c \cdot a$  bağıntısından ısıl iletkenlik belirlenir. Çalışmada elde edilen ısıl iletkenlik değerleri Şekil 7’de verilmektedir. Grafik incelendiğinde sıcaklık arttıkça kesici uçların efektif ısıl iletkenliği azalmaktadır.

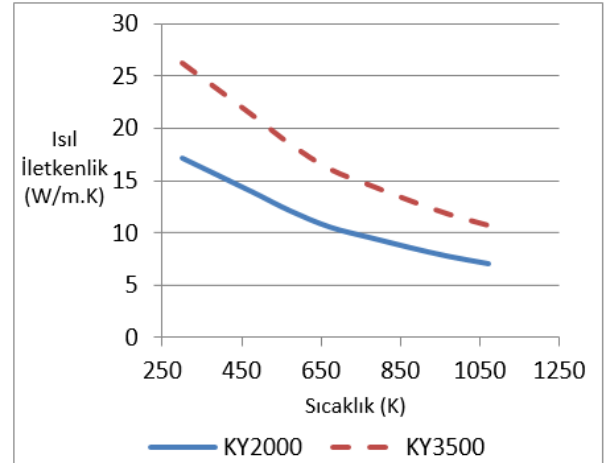


Şekil 7. Deneyel olarak belirlenen ısı iletkenlik (Experimental determination of thermal conductivity)

#### 4.2. Sayısal Çözümlerden Elde Edilen Bulgular (Experimental Thermal Conductivity of Temperature Changes)

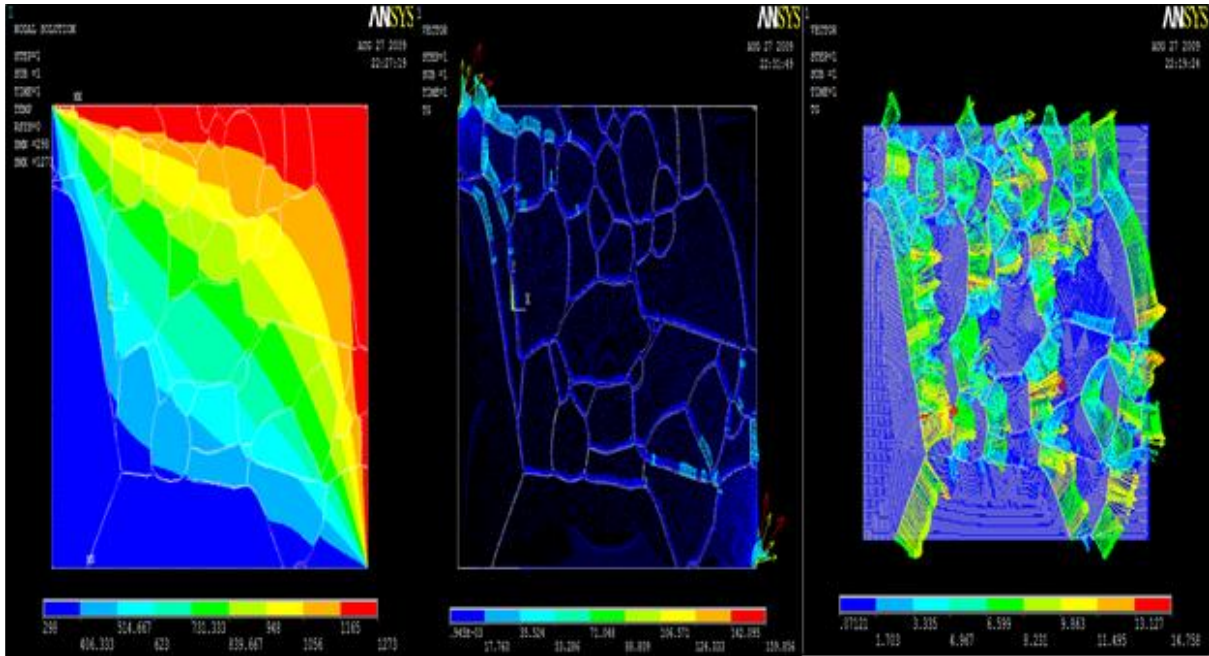
Kesici uç numunelerinin şekil (8.a)'da verilen sıcaklık dağılımları iki boyutlu olarak elde edilmiştir. Eş sıcaklık bölgelerine bakıldığında bölge sınırlarında dalgalanma ve düzgün olmayan kenarlar söz konusudur. Bunun nedeni kesici uçlar içerisinde farklı ısı iletkenliğe sahip elementlerin yer almasıdır. Şekil (8.b) ve (8.c)'de çözümlerden elde edilen sıcaklık gradyanlarını gösterilmektedir. En yüksek sıcaklık gradyanları elementlerin birleşim noktalarında meydana gelmektedir. Çalışmada

sıcaklık dağılımları kullanılarak kesici uçların Şekil 9'da verilen sayısal ısı iletkenlik değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 9. Sayısal olarak belirlenen ısı iletkenlik (Numerical determination of thermal conductivity)

Çalışmada kullanılan kesici uçların deneysel ve sayısal olarak efektif ısı iletkenlik değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 10'da verilmiştir. Sayısal çözümler deneysel çözümlerden yaklaşık %3-4 hata oranı ile hesaplandığı görülmektedir.



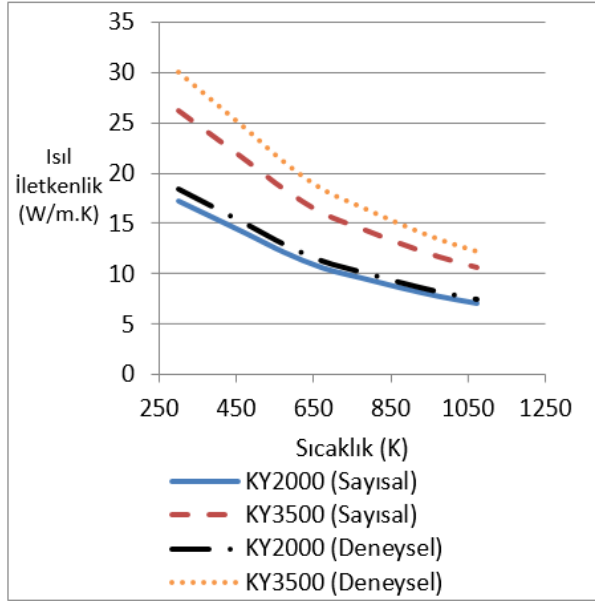
a) Sıcaklık Dağılımı

b) Sıcaklık Gradyeni-1

c) Sıcaklık Gradyeni-2

Şekil 8. Sıcaklık dağılımları (Temperature distributions)





Şekil 10. Sonuçların karşılaştırılması (Comparison of results)

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

SEM görüntüleri kullanılarak ısı iletkenliğinin belirlenmesi son yıllarda geliştirilen bir yöntemdir. Bu yöntemle elde edilen sonuçların deneysel verilere yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Sayısal hesaplamalardan ortaya çıkan hataların üç nedeni;

- \* Autocad programında görüntü işleme hassasiyeti,
- \* Ansys programında EDS sonuçlarının işlenmesi sırasında meydana gelen eksiklikler
- \* Mesh'in uygun yapılmamasıdır.

Yapılan deneysel ve sayısal çalışmaların sonucunda;

Saf  $\text{Si}_3\text{N}_4$  kullanılarak üretilen KY3500'ün ısı iletkenliği KY2000'den yüksektir. Kesici uçlarda içyapı efektif ısı iletkenliği etkilemektedir. Her iki uç seramik kabul edilmesine rağmen içyapılarındaki farklı katkı oranları nedeniyle ısı iletkenlikleri değişmektedir.

Geleneksel olarak uç üretimi yapılırken önce prototip üretilmekte sonra mekanik ve ısı özellikler belirlenmektedir. Çalışmada geliştirilen SEM görüntüleri kullanılarak ısı özellik belirleme yöntemi uç üretimi yapan firmalara kolaylık sağlayabilir. Uç üretimi yapılırken önce belirli oranlarda katkı malzemeleri belirlenmeli sonra rastgele yerleşim ile elde edilecek bir içyapı çizimi kullanılarak yaklaşık ısı iletkenlik hesaplanmalıdır. Bu şekilde yapılacak ön tasarımın üretim sonrası prototip üzerinde testler yapmaktan daha ekonomik bir yol olduğu görülecektir.

Kesici uçlarda termal şok ani değişen ortam sıcaklığından dolayı ucun çatlaması ile sonuçlanan bir süreçtir. KY3500 numunesi  $\text{Si}_3\text{N}_4$  esaslı olduğundan dolayı termal şok direnci daha yüksektir. Sialon esaslı KY2000'de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  katkısı nedeniyle termal şok direnci düşmektedir.

Seramik kesici uçların aşınma ve korozyon direnci özellikleri yüksektir. Yüksek sıcaklığa karşı

mukavemetleri fazla olduğundan dolayı imalat sanayinde tercih edilmektedir.

Seramik kesici uçların özelliklerinden biri de iyi bir sertliğe sahip olmalarıdır. Çok sert bir malzemeyi işlerken aşınma hızı oldukça düşüktür.

Seramik kesici uçların ısı iletkenliği metallere göre daha düşüktür. Ancak mekanik özelliklerinin önem arz ettiği uygulamalarda tercih edilmektedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Doğan B, Çekel N., "Two-Dimensional And Numerical Analysis Of Sialon-Based Cutting Tips Thermal Conductivity By Using Sem Images", *International Interdisciplinary Journal of Scientific Research*, 1(2): 29-42, (2014).
- [2] Çalışkan F., Tatlı Zz., Kılıç S., ve Sönmez H., "α-  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -β  $\text{SiAlON}$  Seramiklerinin Kesici Takım Potansiyelinin İncelenmesi" *APJES*, 2(2): 07-12, (2014).
- [3] Joshi B., Gyawali G., Wang H., Sekino T., and Lee S., "Thermal And Mechanical Properties of Hot Pressed Translucent  $\text{Y}_2\text{O}_3$  Doped Mg-α/β-Sialon Ceramics" *Journal of Alloys and Compounds*, 557: 112-119, (2013).
- [4] Yaman B., ve Mandal H., "Sialon Seramikleri ve Fe-Esaslı Alaşımlar Arasında Meydana Gelen Kimyasal Etkileşimlerin İncelenmesi", *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22( 2): 234-245, (2009).
- [5] Kushan S., Uzun I., and Doğan, B.,Mandal H.,"Experimental and Finite Element Study of the Thermal Conductivity of α-SiAlON Ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.*, 90(12): 3902-3907, (2007).
- [6] Yokota H., and Ibukiyama M.,"Effect Of Lattice Impurities on The Thermal Conductivity of B- $\text{Si}_3\text{N}_4$ ", *Journal of the European Ceramic Society*, 23(1): 55-60, (2003).
- [7] Yokota H., Yamada S., and M. Ibukiyama,"Effect of Large β- $\text{Si}_3\text{N}_4$  Particles on The Thermal Conductivity of β- $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics", *Journal of the European Ceramic Society*, 23(1): 1175-1182, (2003).
- [8] Baysal M.S.S., Silindirik Elyaf ve Tanecik Katkılı Karma Malzemelerin Efektif Isı İletim Katsayısı, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul, 2001.
- [9] Mandal H., "New Developments in α-Sialon Ceramics", *J. Eur. Ceram. Soc.*, 19(13): 2349-2357, (1999).
- [10] Mitomo M., Hirosaki N., and Mitsushashi T. "Thermal Conductivity Of Sialon Ceramics" *Journal of Materials Science Letters*, 3(10): 915-916, (1984).
- [11] William S., *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, Literatür Yayıncılık, İstanbul, (2001).
- [12] Donald A., *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri*, Nobel Yayınları, Cilt 1, İstanbul, (1998).
- [13] Donald A., *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri*, Nobel Yayınları Cilt 2, İstanbul, (1998).
- [14] Incopera F.P., ve Dewitt D.P., *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri*, Literatür Yayıncılık, İstanbul, (2001).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

Isı transferi akışkanı olarak eriyik tuz kullanılan bir gövde boru tipi ısı değiştiricisinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı ile analizi

*Analysis with computational fluid dynamics software of a shell-and-tube heat exchanger using molten salt as heat transfer fluid*

Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa SÖYLER<sup>1</sup>, Mustafa AKTAŞ<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-4767-5825

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-1187-5120

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Söyler M. ve Aktaş M., “Isı transferi akışkanı olarak eriyik tuz kullanılan bir gövde boru tipi ısı değiştiricisinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı ile analizi”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 13-17, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.389249

# Isı Transferi Akışkanı Olarak Eriyik Tuz Kullanılan Bir Gövde Boru Tipi Isı Değiştiricisinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Programı ile Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Mustafa SÖYLER<sup>1\*</sup>, Mustafa AKTAŞ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 31.10.2016 ; Kabul/Accepted : 05.12.2016)

## ÖZ

Bu çalışmada eriyik tuz kullanılan bir gövde borulu ısı değiştiricisinin ısı transfer performansı bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) programıyla analiz edilmiştir. Bu çalışma literatürde yapılan bir deneyi doğrulamak için gerçekleştirilmiştir. Ticari bir HAD programı olan ANSYS Fluent 14.5 sürümü bu çalışmada kullanılmıştır. Eriyik tuz ısı değiştiricisine farklı sıcaklık aralıklarında (360 °C – 400 °C) ve farklı debilerde (0,48 – 1,87 m<sup>3</sup>/h) girmektedir. Elde edilen sayısal sonuçlar ile literatürden seçilen çalışmadaki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır ve iyi bir uyum sağlandığı görülmüştür. Bu çalışmada geliştirilen sayısal HAD modeli ileriki çalışmalarda kullanılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Eriyik tuz, HAD, ısı değiştiricisi.

## Analysis with Computational Fluid Dynamics Software of a Shell-and-Tube Heat Exchanger Using Molten Salt as Heat Transfer Fluid

### ABSTRACT

In this present study, heat transfer performance of a shell and tube heat exchanger used molten salt is analyzed by a computational fluid dynamic (CFD) programming. The model is prepared regard as a literature study that includes experimental results for validation. ANSYS 14.5 numerical package software is used in the solution of cases. The special heat transfer fluid, molten salt is used as fluid material that has been used between 360 °C – 400 °C and 0,48 – 1,87 m<sup>3</sup>/h. The numerical results are compared with experimental results in literature and a good conformity has been achieved with considering limited numerical errors. In this study may be used in future studies developed numerical CFD models.

**Keywords:** Molten salt, CFD, heat exchanger

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yoğunlaştırılmış güneş santralleri (YGS) temiz ve yenilenebilir enerji için çok büyük bir potansiyeldir [1]. Birçok farklı çalışma akışkanı YGS sistemlerinde kullanılmaktadır [2-4]. Uygun ısı transfer akışkanı ve ısı depolama sistemlerini seçmek YGS teknolojisinin gelecekteki başarısı için anahtar rol oynamaktadır. Eriyik tuzun YGS'nde depolama ve ısı transferi akışkanı olarak kullanılma sebepleri; geniş çalışma sıcaklığı aralığı, düşük buharlaşma basıncı (<1 atm), büyük ısı kapasitesi, yüksek termal iletkenlik, düşük viskozite, iyi kimyasal kararlılık ve düşük fiyatıdır [5-8].

Isı transferi akışkanı direkt olarak türbinde elektrik üretiminde kullanılabilir ya da çoğunlukla bir ısı değiştiriciyle birlikte buhar üretmek için kullanılabilir [9,10]. Isı transferi akışkanı YGS sistemlerinin verimliliği ve performansı açısından en önemli unsurdur.

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

Isı transferi akışkanı olarak kullanılan eriyik tuz direkt olarak buhar üretmek için kullanılacağı gibi güneşin olmadığı durumlarda ise enerjiyi uzun süre depolayabilir [11-14].

Zorlanmış ısı transferi, ısı değiştiricilerin birçok tipinde kullanılmaktadır. Birçok araştırmacı farklı çalışma akışkanları ile birlikte geçiş ve türbülanslı bölgenin ısı transferini araştırmışlardır. Sieder ve Tate borudaki akışkanın ısı transferini ve basınç düşüşünü deneysel olarak bulmuş ve önemli bir ısı transferi bağıntısı geliştirmiştir [15]. Gnielinski, Sieder ve Tate'nin deneysel sonuçlarını kullanarak türbülanslı borudaki ısı transferi için yeni bir ısı transferi bağıntısı üretmiştir [16]. Petukhov türbülanslı borudaki akışkanın farklı fiziksel özelliklerinde ısı transferini ve sürtünmeyi çalışmıştır [17]. Birçok literatürde eriyik tuzlu sistemlerin ısı depolama karakteristikleri incelenmiştir [18, 19]. Ancak eriyik tuzun ısı transfer akışkanı olarak ısı transferinin incelenmesi azdır. Hoffman ve ark. LiF-NaF-KF ve NaNO<sub>2</sub>-KNO<sub>3</sub>-NaNO<sub>3</sub> karışık eriyik tuzların ısı

transferini deneysel olarak incelemişlerdir ve farklı eriyik tuzların ısı transfer katsayısını üretmişlerdir [20-21].

Isı değiştiricileri, farklı sıcaklıklardaki iki veya daha fazla arasında oluşan ısı enerjisini sağlayan cihazlardır. Güç üretimi, proses, elektronik, iklimlendirme, soğutma ve uzay uygulamaları gibi geniş kullanım alanlarına sahiptir. Çok fazla ısı değiştiricisi tipleri mevcut olmakla birlikte, bunlardan gövde boru tipi ısı değiştiricisi diğerlerine göre daha fazla kullanım alanına sahiptir. Basit boru sistemine sahip ve küçük ısı transferi alanlı ısı değiştiricilerinden, çok büyük ısı transferi alanlı ve kompleks yüzeyli yoğunlaştırıcı ve buharlaştırıcılara kadar çok çeşitli cihaz şekilleri bulunmaktadır. Gövde boru tipi ısı değiştiricileri bu iki geniş mesafe arasında yer alır [22].

Bu çalışmada, literatürden seçilen ve deneysel çalışması yapılmış [23] küçük bir gövde boru tipi ısı değiştiricisi bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) programıyla modellenmiştir. Ticari bir HAD programı olan ANSYS Fluent 14.5 sürümü bu çalışmada kullanılmıştır. Alınan sonuçlara göre uygun mesh ve türbülans modeli bulunmuştur. HAD programından elde edilen sayısal sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

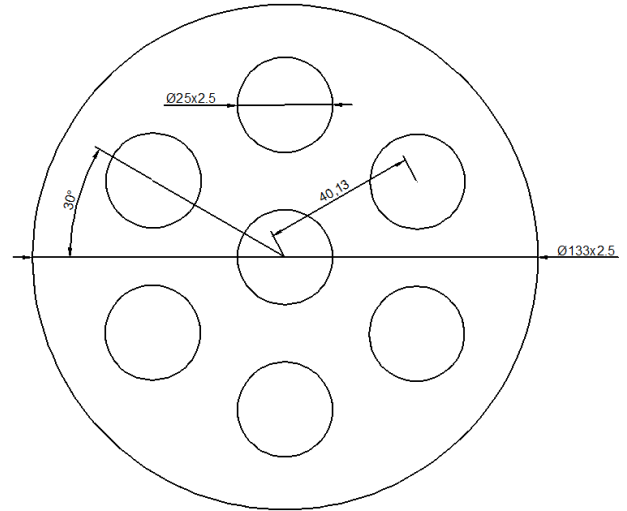
## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada deneysel çalışması yapılan bir gövde boru tipi ısı değiştiricisinin HAD ile analizi yapılmıştır.

### 2.1. Sistem Tanıtımı (System Description)

Gövde boru tipi ısı değiştiricisi paslanmaz çelikten yapılmıştır. Yüksek sıcaklıktaki eriyik tuz hiçbir saptırma olmadan boru demetinin dışında akmaktadır ve ön ısıtma yapılan su ise boru demetinin içinden akmaktadır. Isı değiştiricinin uzunluğu 650 mm olup gövde iç çapı 133 mm' dir. Isı değiştiricisinde 7 adet boru bulunmaktadır ve boruların çapları 25 mm olup 2.5 mm cidar kalınlığına sahiptir [23]. Isı değiştiricisinin temel geometrik özellikleri Şekil 1' de görülmektedir.

Isı kaybını en aza indirmek için 100 mm kalınlığında yalıtım malzemesi kullanılmıştır. Burada su boruların içinden geçerek soğutma görevini üstlenmektedir be eriyik tuz boru demetinin dışından akmaktadır. Suyun basıncı 1 atm' dir ve sıcaklığı yaklaşık kaynama noktasına eşittir. Bu çalışmada ternary nitrat tuzu ( $\text{KNO}_3$ -



Şekil 1. Isı değiştiricisinin geometrisi (Geometry of heat exchanger) [23].

$\text{NaNO}_2$ - $\text{NaNO}_3$ ) ısı transfer akışkanı olarak kullanılmaktadır ve çalışma sıcaklığı aralığı 200-500 °C arasındadır. Eriyik tuzun çalışma sıcaklığı aralığında uygulanabilecek termal özellikleri veren deneysel bağıntılar Çizelge 1' de verilmektedir.

Çizelge 1' de eriyik tuzun termal özelliklerini veren ifadede  $T$  ile ifade edilen sıcaklık Celcius derecedir.

### 2.2. Veri Analizi (Data Analysis)

Boru demetinin dışındaki eriyik tuzun bulunduğu gövde kısmının ıslak çevresi ve karakteristik uzunluğuna bağlı hidrolik çap hesabı Eşitlik 1.1, 1.2 ve 1.3 ile hesaplanır.

$$S = \frac{\pi}{4} (D^2 - n \cdot d^2) \quad (1.1)$$

$$P = \pi (D + n \cdot d) \quad (1.2)$$

$$D_e = \frac{4S}{P} = \frac{D^2 - nd^2}{D + nd} \quad (1.3)$$

Burada  $D$  gövdenin iç çapını  $d$  borunun dış çapını ifade etmektedir  $n$  ise boru sayısıdır.

Boru yüzeyindeki ısı akısı:

$$q'' = \frac{\rho c_p (T_g - T_c) \dot{V}}{n \cdot \pi d \cdot l} \quad (2)$$

Çizelge 1. Eriyik tuzun termal özelliklerini veren deneysel bağıntılar (Experimental correlations that the thermal properties of molten salt) [21]

Yoğunluk, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$2085 - 0.74T$
Dinamik Viskosite, $\mu$ (g/ms)	$31.6 - 0.195T + 0.00042T^2 - 0.000000313T^3$
Isı İletim Katsayısı, $k$ (W/mK)	$0.697 - 0.000461T$
$C_p$ , (J/kgK)	$1549 - 0.15T$

Burada  $T_g$  ve  $T_c$  eriyik tuzun giriş ve çıkışındaki sıcaklıklardır ve  $\dot{V}$  ise debidir.

Eriyik tuzun Reynolds sayısı:

$$Re = \frac{\rho D_e \dot{V}}{\mu S} \quad (3)$$

Boru yüzeyindeki eriyik tuzun Nu sayısı:

$$Nu = \frac{D_e q''}{k (T_w - T_f)} \quad (4)$$

Burada  $T_f$  eriyik tuzun giriş ve çıkış sıcaklıklarının ve  $T_w$  ise boru demetinin yüzey sıcaklığının ortalamasıdır.

Deneyde kullanılan ölçüm aletlerinden doğan belirsizliklerin, alınan ve hesaplanan verilere etkileri belirsizlik analizi yöntemiyle hesaplanarak bulunmuştur [23]. Belirsizlik analizi sonuçlarına göre ısı transferi katsayısı ve ısı akısının deneysel belirsizliği % 6.26, Nusselt sayısının ise % 8.56' dır.

### 2.3. Korunum Denklemleri (Governing Equations)

Boru içi akışlarda süreklilik denklemi Eşitlik 5.1'deki gibidir.

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (5.1)$$

Momentum Denklemi:

x – momentum

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + X \quad (5.2)$$

y – momentum

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + Y \quad (5.3)$$

z – momentum

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + Z \quad (5.4)$$

Enerji Denklemi:

$$\dot{Q}_{kh} - \dot{m}_i e_{fi} = \frac{dE_{kh}}{dt} + \dot{m}_c e_{fc} + \dot{W}_{kh} \quad (5.5)$$

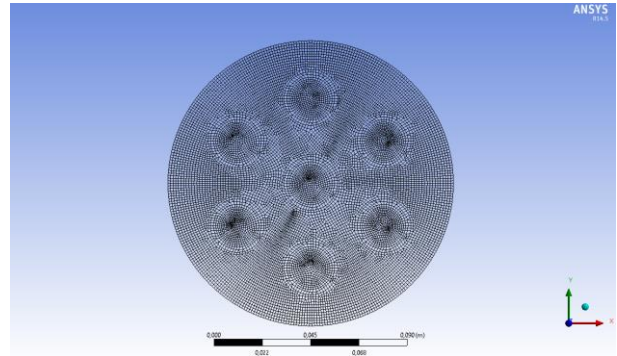
Eşitlik 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 ve 5.5'te kapalı formları verilen denklemlerde p basınç,  $\rho$  yoğunluk, u, v ve w hız bileşenleri, t zaman, X, Y ve Z birim kütleye etkiyen kuvvetin x, y ve z eksenlerine paralel bileşenleridir. Ayrıca enerji denkleminde  $\dot{Q}_{kh}$  kontrol hacmine birim zamanda giren ısı,  $\dot{m}_i e_{fi}$  kontrol hacmine birim zamanda giren kütlelerin akış enerjisi,  $\dot{m}_c e_{fc}$  kontrol hacminden birim zamanda çıkan kütlelerin akış enerjisi,  $dE_{kh}/dt$  kontrol hacmi sınırları içerisindeki enerjinin birim zamanda değişim hızı ve  $\dot{W}_{kh}$  birim zamanda yapılan iştir [24].

### 2.4. Sınır Şartları (Boundary Conditions)

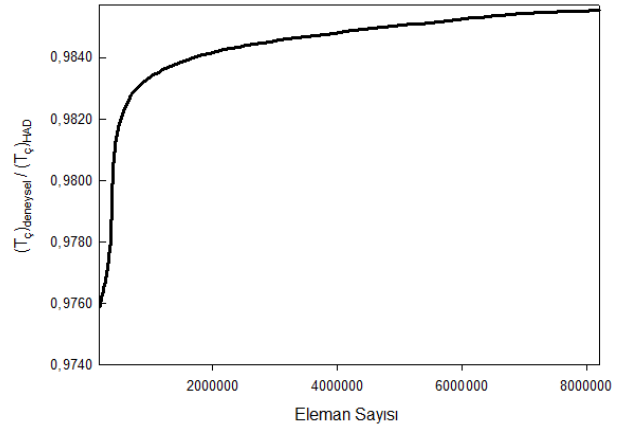
Eriyik tuz ısı değiştiricisine 360 °C – 400 °C sıcaklıkları arasında ve 0,48 – 1,87 m<sup>3</sup>/h debileri arasında giriş yapmakta, su ise 1 atm ve 99 °C sıcaklığında ısı değiştiricisine giriş yapmaktadır. Akış aynı yönlü ve paraleldir. Isı değiştiricinin yalıtımı mükemmel olduğu varsayılarak adyabatik bir sistem olarak ele alınmıştır.

### 2.5. Sayısal Ağ Seçimi (Mesh Selection)

Bu çalışmada 6 farklı sayısal modelde işlem yapılmıştır ve sırasıyla bu modeller 186418, 372320, 738500, 6744164, 7768432, 8692146 eleman sayısına sahiptir. Eriyik tuzun çıkış sıcaklığı referans noktası alınarak deneysel sonuçlarla oranlanmıştır. Seçilecek en uygun eleman sayısı 6 744 164' dır çünkü bu noktadan sonra sıcaklık değişimi kayda değer bir artış göstermemektedir ve aynı zamanda eleman sayısı arttıkça sayısal analizin süresini oldukça arttırmaktadır. Modelin sayısal ağ görüntüsü Şekil 2' de gösterilmiştir. Eleman sayısının deneysel ve sayısal sonuçlara oranını gösteren grafik Şekil 3' de görülmektedir.



Şekil 2. Seçilen modelin sayısal ağ görüntüsü (Mesh view of selected numerical model)



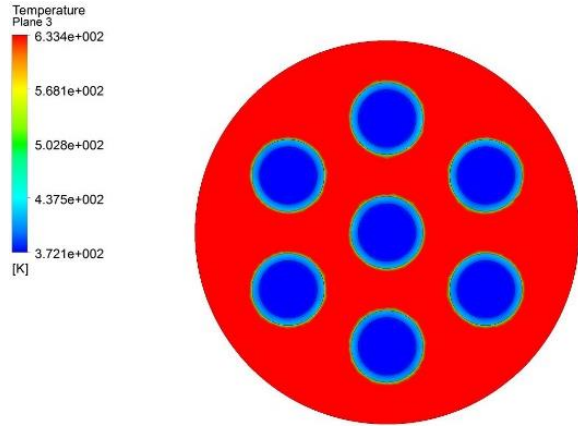
Şekil 3. Eriyik tuzun çıkış sıcaklığı için  $(T_c)_{deneysel}/(T_c)_{HAD}$  değerinin farklı eleman sayılarından bağımsızlığının gösterimi (Mesh independent illustration of molten salt outlet temperature for  $(T_c)_{exp}/(T_c)_{CFD}$ )

### 2.6. Türbülans Modeli (Turbulence Model)

Eriyik tuz çok düşük debilerde akmaktadır ve laminer bir akış sergilemektedir. Diğer akışkan olan su ise türbülanslı bölgede akmaktadır. Su için kullanılan türbülans modeli standart k-ε modelidir. Literatürde genellikle kullanılan model olan standart k-ε modeli bu çalışmada da kullanılmıştır. Diğer türbülans modelleri denenmiş ancak en iyi sonucu k-ε modeli vermiştir.

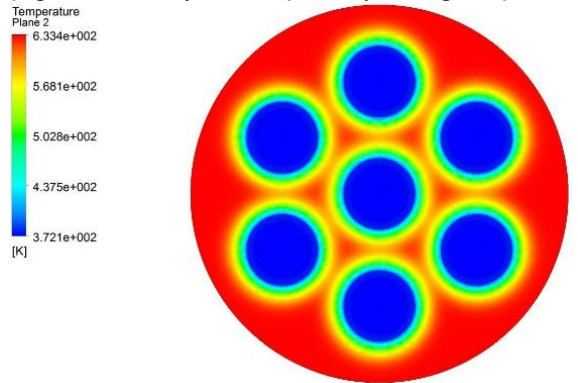
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Bu çalışmada geliştirdiğimiz sayısal metotla deneysel sonuçlar uyumlu çıkmıştır. Bu da çalışmanın güvenilirliğini ortaya koymuştur. Isı değiştiricisinin giriş ve çıkış sıcaklık dağılımları Şekil 4 ve Şekil 5' de gösterilmektedir.

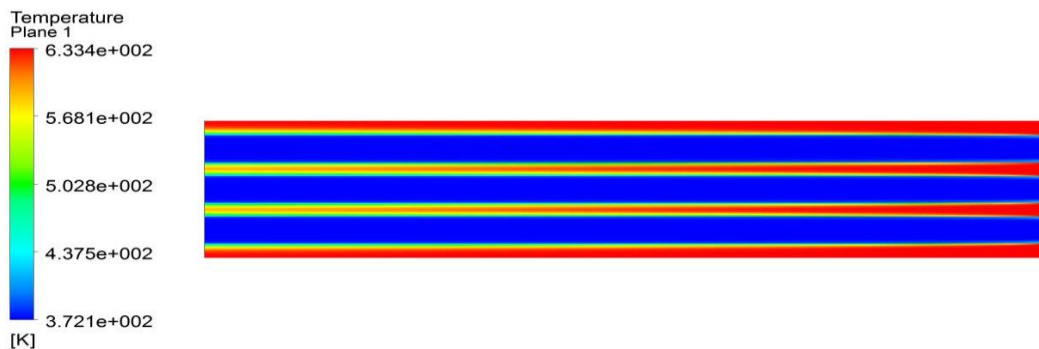


Şekil 4. Isı değiştiricisinin giriş sıcaklık dağılımı (Inlet temperature distribution of the heat exchanger)

Isı değiştiricisinin sıcaklık dağılımı aksel olarak alınan kesit ile Şekil 6'da gösterilmektedir. HAD programından alınan sonuçlar deneysel belirsizlik analizde göz önünde bulundurularak gösterilmiştir. Sayısal sonuçlar büyük çoğunlukla deneysel sonuçlarla uyum sağlamıştır.



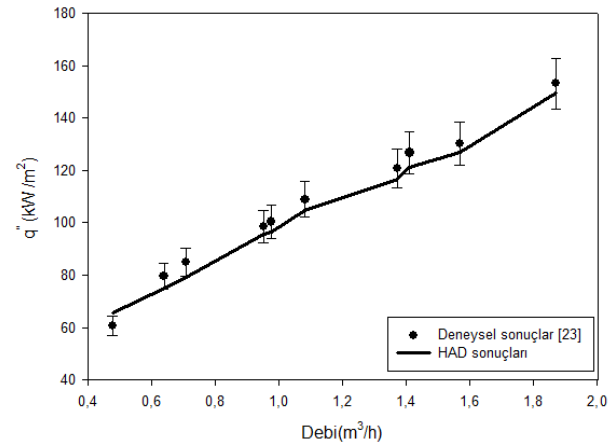
Şekil 5. Isı değiştiricisinin çıkış sıcaklık dağılımı (Outlet temperature distribution of the heat exchanger)



Şekil 6. Isı değiştiricisinin aksinden alınan görüntü (Images from the axis of the heat exchanger)

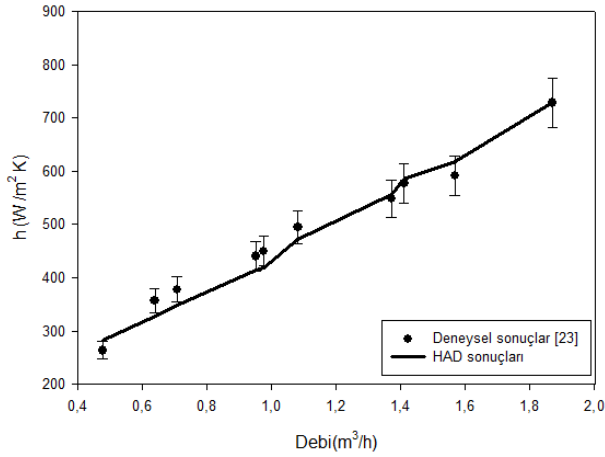
Eriyik tuzun ısı akısının farklı debilerde  $\dot{V}=0.48-1.87$  m<sup>3</sup>/h ve sıcaklıklarda  $T_f=360-400$  °C değişimini gösteren grafik Şekil 7' de verilmiştir. Bu grafikte deneysel sonuçlarla sayısal sonuçlar karşılaştırılmış olup iyi bir uyum görülmektedir.

Sayısal sonuçlarla deneysel sonuçlar arasındaki minimum sapma % 2.37, maksimum sapma ise % 7.48'dir bu sapmalar ise deneysel hatalar içinde kalmaktadır. Eriyik tuzun ısı transfer katsayısının farklı debilerde  $\dot{V}=0.48-1.87$  m<sup>3</sup>/h ve sıcaklıklarda  $T_f=360-400$  °C değişimini gösteren grafik Şekil 8' de verilmiştir. Bu grafikte de görüldüğü üzere sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sağlamaktadır. Sayısal sonuçlarla deneysel sonuçlar arasındaki minimum sapma % 0.26, maksimum sapma ise % 8.58'dir bu sapmalar ise deneysel hatalar içinde kalmaktadır.

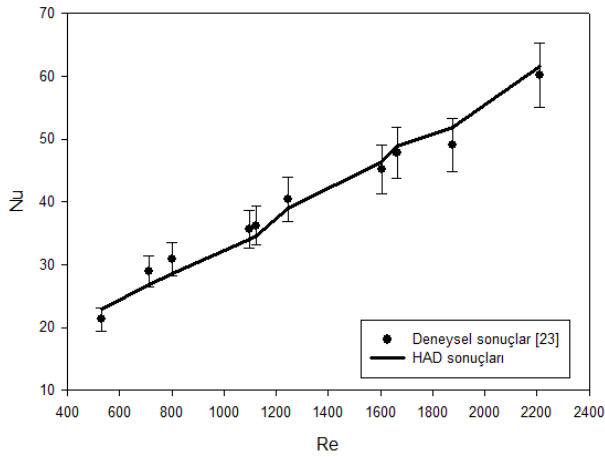


Şekil 7. Farklı debi ve sıcaklıklarda eriyik tuzun ısı akısının değişimi (Variation of different volumetric flow rate and temperature of the molten salt heat flux)

Eriyik tuzun Nusselt sayısının farklı Reynolds sayılarında ve sıcaklıklarda ( $T_f=360-400$  °C) değişimini gösteren grafik Şekil 9' de verilmiştir. Bu grafikte de görüldüğü üzere sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sağlamaktadır. Sayısal sonuçlarla deneysel sonuçlar arasındaki minimum sapma % 2.30, maksimum sapma ise % 8.10'dur ve bu sapmalar ise deneysel hatalar içinde kalmaktadır.



**Şekil 8.** Farklı debi ve sıcaklıklarda eriyik tuzun ısı transfer katsayısının değişimi (Variation of different volumetric flow rate and temperature of the molten heat transfer coefficient)



**Şekil 9.** Eriyik tuzun Nusselt sayısı değişimi (Molten salt Nusselt's number changes)

Isı transferi için deneysel veriler genellikle makul bir duyarlılıkla basit bir üst kanunu bağıntısı biçiminde verilir [25]:

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (6)$$

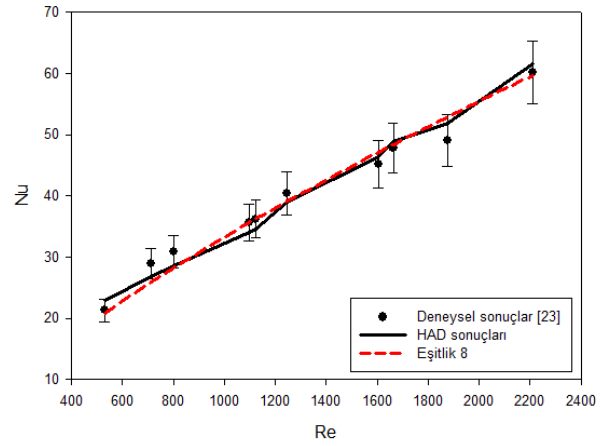
Burada m ve n sabit üstlerdir (genellikle 0 ile 1 arasında) ve C sabitinin değeri geometriye bağlıdır [24]. Eşitlik 6 verilen bağıntıda  $Pr^n$  ifadesini sabit almak şartıyla  $C_1 = C Pr^n$  bağıntısı tarif edilerek;

$$Nu = C_1 Re^m \quad (7)$$

Eşitlik 7 elde edilir. Eldeki HAD verilerini kullanarak bu bağıntıda bulunan katsayılar  $C_1=0.21$  ve  $m=0.74$  olarak bulunmuştur ve buradan Eşitlik 8' deki gibi bir bağıntı elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar, HAD sonuçları ve elde edilen Eşitlik 8' deki bağıntı şekil 10' da gösterilmektedir.

$$Nu = 0.21 Re^{0.74} \quad (8)$$

Elde edilen bu bağıntı pratik olarak ön hesaplamalarda kullanılabilir.



**Şekil 10.** Elde edilen bağıntının (eşitlik 8) deneysel ve HAD sonuçlarıyla karşılaştırılması (The resulting correlation (equation 8) compared with experimental and CFD results)

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Bunlar;

- Literatürden alınan deneysel verilerle [23] farklı sıcaklık (360-400 °C) ve farklı debi (0.48-1.87 m³/h) değerlerine bağlı olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri çözüm için kullanılmıştır.
- Deneysel sonuçlarla HAD analizleri arasındaki uyum çok iyi çıkmıştır. Bu nedenle yapılan bu çalışmada sayısal analiz doğrulanmıştır.
- Deneysel sonuçlarda elde edilen ısı akısı ve ısı transfer katsayısı değerleri HAD analizi sonuçları ile karşılaştırılmış ve maksimum % 8.58 sapma hesaplanmıştır. Deneyde elde edilen belirsizlikler kullanılarak karşılaştırma yapıldığında sonuçların gayet uyumlu olduğu görülmüştür.
- HAD analizinden elde edilen Nusselt sayısı deneysel sonuçlar ile kıyaslandığında % 8.10' luk bir sahiptir ve bu değer deneysel sapmalar (belirsizlik analizinde hesaplanan %8.56) göz önünde bulundurulduğunda sonuçların deneysel sapmaların içinde olduğu çıkmaktadır.
- Bu çalışmada aynı zamanda HAD analizlerinin sonuçları göz önünde bulundurularak Nusselt sayısı için bir bağıntı elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ve HAD analizlerinin sonuçları ile bu bağıntı karşılaştırılmış ve gayet uyumlu çıkmıştır.
- Genel bir sonuç olarak, HAD programı kullanılarak ve deneylerle desteklenerek gövde boru tipi ısı değiştiricinin tasarım süresi hızlandırılabilir ve nihai tasarım kalitesini arttırabiliriz. Yakın gelecekte, bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler çok daha büyük gövde boru tipi ısı değiştiricileri tasarımlarını mümkün kılacaktır.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Wei X., Peng Q., Ding J., Yang X., Yang J.P., Long B., “Theoretical study on thermal stability of molten salt for solar thermal power”, *Appl. Therm. Eng.*, 54: 140–144, (2013).
- [2] Pacio J., Singer C., Wetzel T., Uhlig R., “Thermodynamic evaluation of liquid metals as heat transfer fluids in concentrated solar power plants”, *Appl. Therm. Eng.*, 60: 295-302, (2013).
- [3] Rovira A., Montes M.J., Varela F., Gil M., “Comparison of heat transfer fluid and direct steam generation technologies for integrated solar combined cycles”, *Appl. Therm. Eng.*, 52: 264-274 (2013).
- [4] Mussard M., Nydal, O.J., “Comparison of oil and aluminum-based heat storage charged with a small-scale solar parabolic trough”, *Appl. Therm. Eng.*, 58: 146-154, (2013).
- [5] Kearney D., Kelly B., Herrmann U., “Engineering aspects of a molten salt heat transfer fluid in a trough solar field”, *Energy*, 29: 861–864, (2004).
- [6] Sohal M.S., Sabharwall P., Calderoni P., “Conceptual Design of Forced Convection Molten Salt Heat Transfer Testing Loop”, *INL/EXT-10-19908*, 6–10, (2010).
- [7] Olivares R.I., “The thermal stability of molten nitrite/nitrates salt for solar thermal energy storage in different atmospheres”, *Sol. Energy*, 86: 2576–2583, (2012).
- [8] Wang Y.J., . Liu Q.B, Lei L.J., Jin H.G., “A three-dimensional simulation of a parabolic trough solar collector system using molten salt as heat transfer fluid”, *Appl. Therm. Eng.*, 70: 462–476 (2014).
- [9] Cordaro JG, Rubin NC, Bradshaw RW., “Multicomponent molten salt mixtures based on nitrate/nitrite anions”, *J Sol Energy Eng-Trans ASME*, 133: 011014, (2011).
- [10] Barlev D, Vidu R, Stroeve P., “Innovation in concentrated solar power”, *Sol Energy Mater Sol Cells*, 95: 2703–25, (2011).
- [11] Ruegamer T., Kamp H., Kuckelkorn T., Schiel W., Weinrebe G., Nava P., Riffelmann K.J., “Molten Salt for Parabolic Trough Applications: System Simulation and Scale Effects”, *Energy Procedia*, 00: 000–000, (2013).
- [12] Zhang HL, Baeyens J, Degreve J, Caceres G., “Concentrated solar power plants: review and design methodology”, *Renew Sustain Energy Rev.*, 22: 466–81 (2013).
- [13] Pacheco J.E., Showalter S.K., Kolb W.J., “Development of a Molten-Salt Thermocline Thermal Storage System for Parabolic Trough Plants”, *J. Sol. Energy Eng.*, 124(2): 153-159, (2002).
- [14] Zalba B., Marin J.M., Cabeza L. F., Mehling H., “Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications”, *Applied Thermal Eng.*, 23: 251–283,(2003).
- [15] Sieder E.N., Tate G.E., “Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes”, *Ind. Eng. Chem.*, 28: 1429-1435, (1936).
- [16] Gnielinski V., “New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow”, *Int. Chem. Eng.*, 16: 359-367, (1976).
- [17] Petukhov B.S., “Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties”, *Advances in Heat Transfer*, 6: 503-565, (1970).
- [18] Y. Zhen, S.V. Garimella, “Thermal analysis of solar thermal energy storage in a molten-salt thermocline”, *Sol. Energy*, 88: 974-985, (2011).
- [19] Xu C., Wang Z.F., He Y.L., Li X., Bai F.W., “Sensitivity analysis of the numerical study on the thermal performance of a packed-bed molten salt thermocline thermal storage system”, *Appl. Energy*, 92: 65-75, (2011).
- [20] Hoffman H.W., Lones J., “Fused Salt Heat Transfer, Part II: Forced Convection Heat Transfer in Circular Tubes Containing NaF–KF–LiF Eutectic”, *ORNL-1777*, (1955).
- [21] Hoffman H.W., Cohen S.I., “Fused Salt Heat Transfer, Part III: Forced Convection Heat Transfer in Circular Tubes Containing the Salt Mixture NaNO<sub>2</sub>–KNO<sub>3</sub>–NaNO<sub>3</sub>”, *ORNL-2433*, (1960).
- [22] Kakaç S., Liu H., “*Heat Exchangers Selection, Rating and Thermal Design*”, Second edition, CRC Press, USA, (2002).
- [23] He, S., Lu, J., Ding, J., Yu, T., Yuan, Y. “Convective heat transfer of molten salt outside the tube bundle of heat exchanger”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 59: 9-14, (2014).
- [24] White, F.M.. “*Akışkanlar Mekaniği*”, (çev. K. Kırkköprü, E. Ayder) Literatür Yayınevi (Eserin orijinali 1979’da yayımlandı), Birinci Baskı, Türkiye, (2004).
- [25] Bergman T.L., Incropera F. P., DeWitt D.P., Lavine A.S. “*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*”, Seventh edition, Wiley, USA, (2011).





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

## Synthesis and application of a low emulsifier content composite polyacrylic latex for leather finishing

*Deri finisajı için düşük emülgatör içerikli kompozit yapılı bir poliakrilik lateks sentezi ve uygulaması*

*Yazar(lar) (Author(s)): Onur YILMAZ<sup>1</sup>, Catalina Natalia CHEABURU-YILMAZ<sup>2</sup>*

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-0992-5937

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-5229-8986

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Yılmaz O. ve Cheaburu-Yılmaz C. N., "Synthesis and application of a low emulsifier content composite polyacrylic latex for leather finishing", *Politeknik Dergisi*, (21)1: 19-25, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.376390

# Synthesis and Application of a Low Emulsifier Content Composite Polyacrylic Latex for Leather Finishing

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Onur YILMAZ<sup>1\*</sup>, Catalina Natalia CHEABURU-YILMAZ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ege University, Faculty of Engineering, Leather Engineering Department, 35100, Bornova, Izmir, Turkey

<sup>2</sup>Petru Poni Institute of Macromolecular Chemistry of the Romanian Academy, Laboratory of Physical Chemistry of Polymers, 41A Grigore Ghica Voda Alley, 700487, Iasi, Romania

(Geliş/Received : 01.11.2016 ; Kabul/Accepted : 07.12.2016)

## ABSTRACT

A composite polyacrylic latex via two stage seeded emulsion polymerization with low emulsifier content (0.5 wt.%) was synthesized and characterized by means of particle size and zeta potential analysis, FTIR and differential scanning calorimetry (DSC). The results verified a very uniform particle size distribution and good electrostatic stability. The different phases of the composite polymer were evidenced by DSC analysis with two clear phase transitions. The application of the latex on leathers as coating binder revealed good fastness levels to dry/wet rubbing and water spotting. The synthesized composite latex was found to be good candidate for producing cost-effective waterborne binders with good performance.

**Keywords:** Composite latex, leather finishing, coating, acrylate, emulsion polymerization.

## Deri Finisajı için Düşük Emülgatör İçerikli Kompozit Yapılı bir Poliakrilik Lateks Sentezi ve Aplikasyonu

### ÖZ

Kompozit yapılı bir poliakrilik lateks, iki aşamalı tohumlanmış emülsiyon polimerizasyonu ile düşük emülgatör içerikli (ağ. %0.5) olarak sentezlenmiş; partikül boyutu ve zeta potansiyeli analizi, FTIR ve diferansiyel taramalı kalorimetri kullanılarak karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar lateksin çok homojen bir partikül boyutu dağılımına ve iyi elektrostatik stabiliteye sahip olduğunu göstermiştir. Kompozit polimerin farklı fazları DSC analizi ile iki net faz geçişi olarak ortaya konmuştur. Lateksin mamul derilerde kaplama binderi olarak uygulanması sonrasında, yaş/kuru sürtme haslıkları ile su damlası haslığı testlerinin iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Sentezlenen lateksin, iyi performansla sahip, düşük maliyetli su bazlı binderlerin üretimi için iyi bir aday olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kompozit lateks, deri finisajı, kaplama, akrilat, emülsiyon polimerizasyonu.

### 1. INTRODUCTION

Acrylic latexes are widely used as waterborne coating polymers for many industrial applications, especially for paints and coatings [1,2]. Due to resistance to hydrolysis, high block resistance, hardness–softness, good adhesiveness, good film forming properties, resistance to UV light and inexpensiveness of acrylates, they are also the most common commercial binders

used in leather industry [3-5]. On the other hand, the physical and chemical performance of the acrylic polymers are substantially lower than polyurethane based binders leading in general to a reduction in the overall performance of the finish [6]. However, the higher cost of polyurethane based finishing systems encourages the efforts to increase the performance of acrylic based polymers.

In the last decade the composite latex particles are of great importance since their physical properties can be tailored [7]. They are widely used in industrial applications, e.g., coatings, paints, adhesives, paper, textile manufacturing, etc [8-16]. These materials usually have better properties than those of conventional polymers and/or blending of two or more polymer components [17]. Such kind of latexes are commonly known as composite or core-shell latexes and are usually made by emulsion polymerization in a two or multi-stage process where in the first step a seed latex (core) is formed from a monomer composition and in the second step another monomer composition is polymerized over the core to form the shell [16,18]. The polymers with two distinct phases usually have different compositions leading to different properties such as hardness and softness, hydrophobicity, molecular weight, adhesion, etc., which affect the properties of the final polymer. In this way, the advantages of different polymer

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : onur.yilmaz@ege.edu.tr

characteristics can be combined to enhance the final performance of coatings. Some efforts already have been made by using composite technology to increase the performance and functionality of acrylic binders for leather finishing. Krings et al. [6] reported on the development of polyurethane-polyacrylate hybrid materials to be used in finishing application. They marked the improved polymer properties and finishing performance of the urethane/acrylic hybrid polymer dispersions that cannot be achieved by typical polymer dispersions. Qinhuan et al. [19] prepared acrylic core-shell latexes including fluorine containing monomer in the second phase composition and they tested the performance of finished leathers. They used butyl acrylate (BA) and methyl methacrylate (MMA) monomers both in the phase compositions, and dodecafluoroheptyl methacrylate in the second phase. They obtained improved water contact angles and wet rub resistance for composite latex coated leathers. A cationic polyacrylate emulsion with a core-shell structure by seeded emulsion polymerization was reported by Sui et al. [20]. BA and MMA comonomers were used in both core and shell parts and a cationic monomer synthesized by reacting dimethylaminoethyl methacrylate (DMAEMA) and n-butyl bromide used in the shell composition. They observed that the leathers coated with cationic core-shell latex showed many improvements with strong adhesion and resistance to dry and wet rubbing. Liu et al. [21] prepared polyacrylate/nano-SiO<sub>2</sub> core-shell composite latexes via semi-continuous emulsion polymerization stabilized with polymerizable surfactant. They used the core-shell latex for finishing of leathers and obtained better resistance to water uptake, improved water vapor permeability and increased dry and wet rub fastness properties. Another study describing the preparation of a core-shell resin emulsion with styrene, methyl methacrylate, acrylonitrile as monomer; butyl acrylate, methyl methacrylate, acrylic acid as shell monomer was reported by Zhao and Zhao [22]. They also introduced nano-TiO<sub>2</sub> in the shell phase as well as a crosslinking agent in low amounts. They showed that the leathers finished with core-shell emulsion exhibited good resistance to solvent, wet and dry rubbing. In recent studies by Ma et al. [23,24] the syntheses of core-shell structural casein based latexes and their potential application in leather finishing also have been reported. All these studies in the last years show that there is an

increasing interest on synthesis of composite polymeric latexes to obtain high performance leather finishing agents. However, in many studies fluorine or silicone containing moieties have been used to improve the performance of the coating which affects greatly the cost of their production.

Surfactants play a crucial role in the production of emulsion polymers as emulsification of monomers, formation of micelles as polymerization loci and colloidal stabilization of particles. However, they have also tendency to cluster together or migrate either to the film-air interface or the film-substrate interface. In this way they affect the water sensitivity of the coating, as well as the adhesion characteristics especially when they are used in high amounts. The polymerizable surfactants used to overcome this problem often have less reactivity in comparison to the monomer units which may lead to poor incorporation or homopolymerization of the surfactants in water phase [25]. Surfactant-free emulsion polymerization approach took attention the last decade and can also be used to produce latexes. However, they usually result in larger particle sizes, increased amount of coagulum or filterable solids/scrap and decreased shelf-life stability due to the lack of emulsifiers [26]. Therefore, for the production of low particle size and long term stable latexes the use of surfactants to some extent seems unavoidable especially for the latexes used for coating purposes. On the other hand, by proper monomer compositions and control on the polymerization surfactant level can be minimized. Present study describes the synthesis of a stable composite acrylic latex by a two stage seeded emulsion polymerization with low emulsifier content to obtain high performance finishing binder in a cost effective manner by using common and cheap components. The polymer characteristics and the performance properties of the coated leathers were discussed in the study.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Materials

For the synthesis of acrylic latex, butyl methacrylate (BMA), 2-hydroxyethylacrylate (HEA), butyl acrylate (BA) and methacrylic acid (MAA) were supplied from Aldrich and used as monomers. The other necessary chemicals; sodium dodecyl benzene sulfonate as emulsifier (SDBS, C<sub>18</sub>H<sub>29</sub>NaO<sub>3</sub>S, tech. grade), potassium

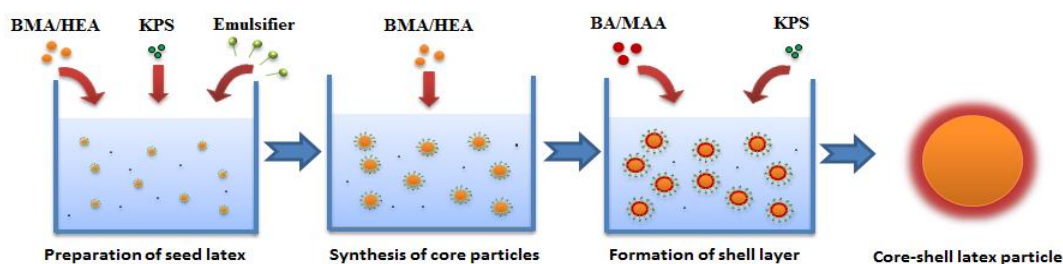


Figure 1. Synthesis route of the core-shell latex

persulfate (KPS,  $K_2S_2O_8$ ,  $\geq 99\%$ ) as initiator, sodium bicarbonate ( $NaHCO_3$ ,  $\geq 99.5\%$ ) as buffer and sodium hydroxide ( $NaOH$ ,  $\geq 99\%$ ) as a general alkaline were also supplied from Aldrich. All chemicals were used as received without any further purification.

A crust bovine upper leather was supplied from a regional tannery company (Sepiciler Inc. Co., Izmir-Turkey) and was used for leather finishing application. Other necessary commercial chemicals for finishing such as pigment, wax, aqueous nitrocellulose lacquer and surface modifier were supplied from different leather chemical suppliers.

## 2.2. Synthesis of the Composite Acrylic Latex

The composite latex was designed to have a hard polymer core (phase-I) that consist of BMA and HEA monomers in a weight ratio of 59:1, and a second phase (phase-II) including BA and MAA with a ratio of 38:2 (w:w). The ratio of the different phases (hard/soft) was chosen as 60:40 by weight, respectively. For the preparation of composite latex particles, selected amount of SDBS emulsifier,  $NaHCO_3$ , half of KPS initiator solution were first dissolved in water and mixed in the reactor for 15 min under nitrogen flow. One third (1/3) of phase-I monomers were first introduced in the system and purged with  $N_2$  to remove the dissolved oxygen and they were polymerized at 70 °C for 45 min to prepare the seed polymer particles. Afterwards, the remaining of the phase-I monomers was dropped into the system within 1 h and kept for another 1.5 h to obtain the first phase latex particles. After the completion of first phase synthesis, the phase-II part monomers were added dropwise into the reactor within 1 h which was followed by the addition of remaining initiator solution. The reaction was kept for additional 2 h at 80 °C for completion of the reaction. At final, the system was cooled down to room temperature and the composite latex was obtained with a total solid content of 25% and a conversion ratio over 99% (measured gravimetrically). The general route of the synthesis was presented in Figure 1. The copolymer films necessary for analysis were obtained by casting the emulsion on a glass substrate and drying at room temperature for 3 days and in oven at 70°C for 1 day.

## 2.3. Experimental Methods

A nanoZS model (Malvern Instruments UK) zetasizer instrument was used for the measurement of particle size and zeta potential of the latex. The IR spectra of the

copolymer film were recorded with a Perkin-Elmer Spectrum-100 ATR-FTIR instrument by scanning in the range of 600-4000  $cm^{-1}$ . Differential scanning calorimetry (DSC) thermographs were recorded with a Perkin Elmer Diamond DSC instrument at a heating rate of 10 °C/min under  $N_2$  atmosphere from -70 to 120°C. The imaging of the finish layer of the leather samples was performed by Hitachi TM-1000 Table-Top scanning electron microscope and the magnitudes are given on the images.

## 2.4. Application of the Composite Latex in Leather Finishing

For finishing application rectangular leather specimens (30 × 40 cm) were cut from the coupon part of the leather. The formulation of finishing mixture consisted of a pigmented coat and a top coat (Table 1). The coating layers were applied by a hand spraying gun with air pressure of 3 atm. After the application of each cross spray, the leathers were dried at 90 °C in a drying tunnel for 3 min and hot plated at given intervals. The formulation was prepared as simple as possible for an easier evaluation of the effect of the composite binder on finish properties. The finished leathers to be tested by physical methods were conditioned according to the standard of ISO 2419:2012 [27]. The efficiency of finishing applied on leathers was evaluated by the physical tests of; flexing endurance [28]; color fastness of leather to To and Fro rubbing [29]; color fastness to water spotting [30]. The evaluation of all the tests related to color change was done according to the Grey Scale Standard (IUF 131-132) which gives a rating between 1 and 5 (5: means no color change, and 1: means failure).

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. Design of Latex Particles

The selection of monomer phases and their ratios were made according to the softness, adhesion and abrasion resistance of the final polymer. Because the leather is a flexible material, the final polymer had to be soft enough to be compatible with the substrate. Therefore, monomers of the first phase were selected to give a relatively hard polymer in nature (glass transition temperature- $T_g$  near room temperature) with a higher weight percentage (60%) in respect to the total polymer mass whereas the second phase ( $T_g$  below 0°C) was chosen to give a soft polymer. The hard part defines the

**Table 1.** The finish formulation applied on the leathers

Components	Application Steps		Descriptions
	Basecoat (I) (parts)	Topcoat (II) (parts)	
Water	35	20	Spray I x 3 times
Pigment	10		Hot plate 80°C/100 bar
Wax	5		
Acrylic Latex	20		Spray I x 3 times
Isopropyl alcohol	0.5		
Aqueous NC Lacquer		10	Spray II x 1 time
Silicone Surface Modifier		0.5	Hot plate 80°C/70 bar

mechanical performance of the latex and the soft part increases the elasticity of the polymer and its adhesion to the substrate. A harder phase could also be chosen having a much higher  $T_g$  ( $\sim 100$  °C) to increase the mechanical performance further, however, in this case the final polymer would be brittle with a higher minimum film forming temperature that could cause difficulties in finishing applications. The small portions of the monomers of HEA and MAA were used to increase the hydrogen bonding capacity of the final polymer which contributes to the adhesion and also to increase the stability of latex due to their hydrophilic character.

### 3.2. Particle Size and Stability of the Latex

The average particle size diameter of the latex particles was found to be 123 nm with a very low polydispersity index of 0.030. The particle size distribution of latex obtained from dynamic light scattering analysis is given in Figure 2. The low particle size latexes below 500 nm can penetrate better into the collagen fibers and enhances the adhesion of the coating as well as keeping the natural look of the grain. Besides, they have better pigment binding efficiency than coarse latex particles, thus increasing the physical properties of the finish. From this point of view, the synthesized latexes with low emulsifier content of 0.5 wt% (based on total monomer amount) exhibited low particle size and very homogenous size distribution for being a good candidate to use as binder in leather finishing.

The zeta potential of the latex was measured as -44.1 mV which showed a good electrostatic stability for the particles. It is known that especially core-shell latexes usually require high concentrations of surfactants just as normal emulsion polymers [25]. High amount of surfactant can contribute negatively to film appearance and film properties by their wetting and migration properties. In the study only 0.5 wt% of anionic emulsifier was used for micelle formation. The low amount of hydrophilic monomers (HEA, MAA) used in the different phases separately contributed to the stability of the particles with the location of hydroxyl and carboxyl groups towards the water phase from the surface of particles. As it's known small portions of carboxylic acid and hydroxyl monomers helps to improve the stabilization of the latexes [31], the freeze-thaw and mechanical stability [32,33], enhances adhesion and increases the critical pigment volume concentration value [34]. In addition, the seeded emulsion polymerization, which was used for the synthesis, usually give a better control for particle growth stage and decreases the risk of coagulation [35,36]. With the given method low emulsifier containing, stable and low particle size composite latex was synthesized successfully.

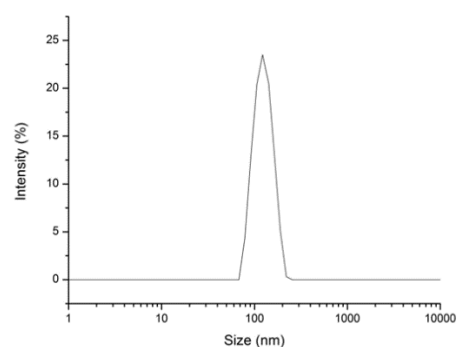


Figure 2. Particle size distribution of the core-shell acrylic latex

### 3.3. IR Spectrum of the Composite Latex

The IR spectrum of copolymer film is given in Figure 3. Corresponding characteristic absorption peaks of poly(BMA-co-HEA) / poly(BA-co-MAA) composite polymer appeared at 2960 (1), 2933 (2), 2873 (3), 1726 (4), 1450-1465 (5), 1154 (6), and 1063 (7)  $\text{cm}^{-1}$ , which can be attributed to the asym stretching of  $-\text{CH}_3$  (1), asym (2) and sym (3) stretching of  $-\text{CH}$  groups of  $\text{CH}_2$ ;  $\text{C}=\text{O}$  stretching (4),  $-\text{CH}_3$  bending (5), O-R stretching (6), and C-O-C stretching (7). The characteristic peaks of MAA and HEA was difficult to observe in the spectrum due to their low amount on the main copolymer backbone. However, the low intensity peaks observed at 3445 and 3290  $\text{cm}^{-1}$  can be attributed to the  $-\text{COOH}$  and  $-\text{OH}$  groups indicating their presence on the polymer. In addition, the characteristic peak of  $\text{C}=\text{C}$  usually appears at 1645  $\text{cm}^{-1}$  due to the residual monomers was not observed in the spectrum showing the success of the reaction.

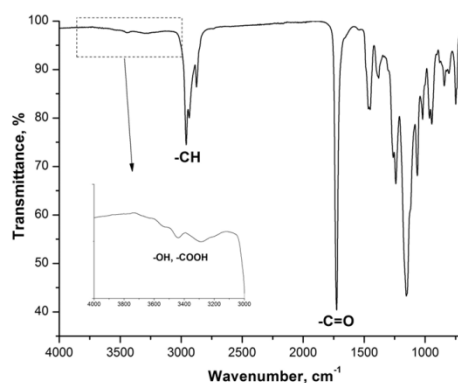
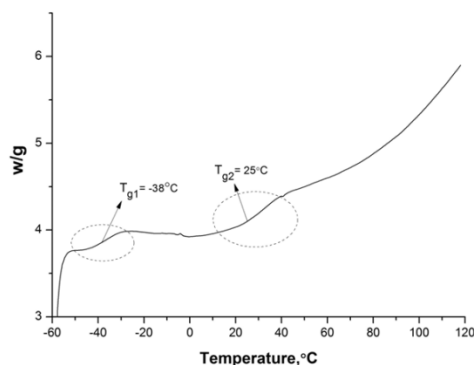


Figure 3. IR spectrum of the poly(BMA-co-HEA) core / poly(BA-co-MAA) shell latex film

### 3.4. Differential Scanning Calorimetry (DSC)

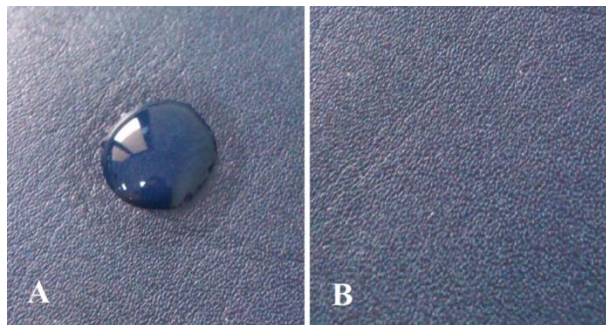
DSC curve of the composite polymer is given in Figure 4. From the thermal behavior of the polymer two clear phase transitions were observed which can be attributed to the different compositions of the different phases of the polymer. The first transition was observed at around  $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$  for soft part and the second at  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  for the hard part with a larger transition. The obtained values were found to be close to the theoretical  $T_g$  values of each phase composition indicating that a two-phase polyacrylic latex was synthesized successfully.



**Figure 4.** DSC curve of the synthesized core-shell latex film

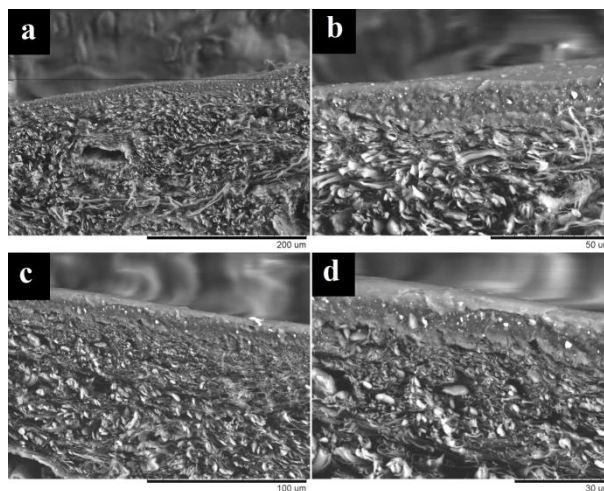
### 3.5. Finishing Performance of the Latex

The finishing formulation (Table 1) was kept simple to evaluate the performance of the composite latex. In addition, one leather sample was finished without applying any topcoat to evaluate the performance of the composite latex alone. The results obtained from the physical tests are given in Table 2. The flexing endurance of the leathers was perfect after 100.000 times of flexing. This showed that the hard phase of the latex did not impair the flexibility of the final coating. The dry and wet rub fastness of the leathers finished with the composite latex gave satisfactory grey scale values even without a top coat layer. To assess further the water behavior of the leathers, a water spotting test was also employed on the composite latex coated leather samples. The results showed that after 30 min the water droplet still remained on the leathers with a partial absorption (Figure 5A), however, there was no color change or a spot on the leather after 16h (Figure 5B).



**Figure 5.** The photographic images of the core-shell latex coated leathers during wet spotting test (A: after 30 min; B: after 16 h)

In Figure 6 the SEM images obtained from the cross-section of finished leathers with and without topcoat layer are given. In Figure 6a,b the homogenous pigmented coating layer deposited on the leather surface can be seen with different magnification. The thickness of the finish layer was found to be less than  $20\text{ }\mu\text{m}$  indicating that not a heavy finish was applied on leathers. The topcoat layer as a more rigid and very thin film structure could also be observed over the pigment layer (Figure 6c,d) with a more opaque appearance. The overall finish layer was thin enough to support the natural look of the leather grain and thick enough to improve the surface properties of the leathers.



**Figure 6.** SEM images of the cross-section of coated leathers without (a,b) and with (c,d) the topcoat layer.

## 4. CONCLUSION

A composite polyacrylate latex with low emulsifier content (0.5 wt%) was synthesized successfully via two stage seeded emulsion polymerization technique. The latex had good electrostatic stability with low average particle size and narrow size distributions. The two different polymer phases of the latex was confirmed by DSC analysis. The application of the composite latex in a basic finishing formulation showed that they were successful as base coat binders for leather finishing by offering good film forming properties, elasticity and pigment binding efficiency as well as glossy and natural look of the leathers. The leathers coated with the composite latex exhibited good fastness levels to dry/wet rubbing and water spotting. The synthesized composite latex was found to be proper for industrial applications as a waterborne acrylic binder in leather finishing providing improved properties with inexpensive production conditions.

**Table 2.** The results of the performance tests applied to the finished leathers

Leather Sample	Flexing endurance (x100.000)	Fastness level 500 rubs (dry)		Fastness level 10 rubs (wet)		Fastness level 25 rubs (wet)		Fastness level after water spotting (16h)
		Leather	Felt	Leather	Felt	Leather	Felt	
C-S latex without topcoat	Excellent	4	3	3/4	2	2	1/2	5
C-S latex with topcoat	Excellent	5	4	5	4	4	3	5

## ACKNOWLEDGMENTS

The study was presented partially as a poster communication in 3<sup>rd</sup> International Leather Engineering Congress “Innovative Aspects for Leather Industry” on May 21-22 2015, Izmir-TURKIYE.

## REFERENCES

- [1] Tıǧlı R. S. and Evren V., “Synthesis and characterization of pure poly(acrylate) latexes”, *Prog. Org. Coat.*, 52 (2): 144–150, (2005).
- [2] Gao D., Zhang W., Ma J., Li C. and Zhang J., “Influence of alcohols on stability and mechanical properties of polyacrylate coating material”, *J. Coat. Technol. Res.*, 12 (6): 997-1004, (2015).
- [3] Schindler F., “Properties distinguishing acrylic polymers as binders for basecoats on leather”, *J. Am. Leather Chem. Assoc.*, 98: 97-100, (2003).
- [4] Greif M. and Cala J. A., “Polymer characteristics and composition and leather finish properties”, *J. Am. Leather Chem. Assoc.*, 67: 480-487, (1972).
- [5] Heidemann E., “Fundamentals of Leather Manufacture”, Eduard Roether KG, Darmstadt, Germany, (1993).
- [6] Krings L., Jimenez M., Oliveras M. and Pont Pi J.M., “Acrylic-urethane hybrid polymers: materials with high potential in leather finishing”, *J. Am. Leather Chem. Assoc.*, 105: 388-394, (2010).
- [7] Khana A. K., Raya B. C. and Dolui S.K., “Preparation of core-shell emulsion polymer and optimization of shell composition with respect to opacity of paint film”, *Prog. Org. Coat.*, 62 (1): 65–70, (2008).
- [8] Kirsch S., Pfau A., Stubbs J. and Sundberg D., “Control of particle morphology and film structures of carboxylated poly (n-butylacrylate)/poly (methyl methacrylate) composite latex particles”, *Colloids Surf. A.*, 183–185: 725–737, (2001).
- [9] Henry F., Cansell F., Guillamine J. L. and Pichot C., “Study of the polymer latex coalescence by dielectric measurements at microwave frequency—feasibility of the method”, *Colloid Polym. Sci.*, 267 (2): 167-178, (1989).
- [10] Gerli A., Berkhout S. and Cardoso X., “Core Shell&Trade: The latest development for the paper industry in the field of polymer technology”, *Wochenblatt Fur Papierfabrikation*, 131: 567-571, (2003).
- [11] Bertelo C., Meunier G., Lermite A., Dargelos P. and Drujon X., “Impact additive of the core/shell type for thermoplastic polymers”, US Patent RE37851, (2002).
- [12] Mendizabal E., Hernandez P. J., Puig J. E., Canche-Escamilla G., Katime I. and Castano V., “Effect of pH on the mechanical properties of functionalized polymers prepared by emulsion polymerization”, *J. Appl. Polym. Sci.*, 74 (14): 3299-3304, (1999).
- [13] Wang G. J., Kang C. S. and Jin R. G., “Synthesis of acrylic core-shell composite polymers and properties of plastisol-gels”, *Prog. Org. Coat.*, 50 (1): 55-61, (2004).
- [14] Zerafati S., Tran M., Quoc B., Gruat N. and Granel C., “Impact modifier combination for polymers”, European Patent EP1207172, (2002).
- [15] Ferguson C. J., Russell G. T. and Gilbert R. G., “Synthesis of lattices with polystyrene cores and poly(vinyl acetate) shells. 1. Use of polystyrene seeds”, *Polymer*, 43 (24): 6371-6382, (2002).
- [16] Hidalgo M., Cavaille J. Y., Guillot J., Guyot A., Pichot C., Rios L. and Vassoille R., “Polystyrene (1) / poly(butyl acrylate-methacrylic acid)(2) core-shell emulsion polymers. Part II: Thermomechanical properties of latex films”, *Colloid Polym. Sci.*, 270 (12): 1208-1221, (1992).
- [17] Borthakur L. J., Jana T. and Dolui S. K., “Preparation of core-shell latex particles by emulsion co-polymerization of styrene and butyl acrylate, and evaluation of their pigment properties in emulsion paints”, *J. Coat. Technol. Res.*, 7 (6): 765–772, (2010).
- [18] Ha J. W., Park L. J. and Kim D. K., “Preparation and characterization of core-shell particles containing perfluoroalkyl acrylate in the shell”, *Macromolecules*, 35 (18): 6811-6818, (2002).
- [19] Qinhuang Y., Tingyou Z. and Zhengjun L., “Characterization and application of low surface energy fluorinated polymer in leather finishing”, *J. Soc. Leath. Tech. Ch.*, 94 (3): 106-110, (2010).
- [20] Sui Z., Zhao X., Song X. and Qiang X., “Synthesis and properties of a cationic acrylic resin leather finish with a core-shell structure”, *J. Soc. Leath. Tech. Ch.*, 96 (3): 94-99, (2012).
- [21] Liu J., Ma J., Bao Y. and Zhu Z., “Synthesis and application of polyacrylate/nano-SiO<sub>2</sub> composite leather finishing agent with polymerizable surfactant”, *Polym.-Plast. Technol. Eng.*, 51: 1460–1467, (2012).
- [22] Zhao X. and Zhao Y., “Preparation and application of a leather finish with core-shell structure”, *Adv. Mater. Res.*, 791-793: 326-329, (2013).
- [23] Ma J., Xu Q., Zhou J., Gao D., Zhang J. and Chen L., “Nano-scale core-shell structural casein based coating latex: synthesis, characterization and its biodegradability”, *Prog. Org. Coat.*, 76: 1346–1355, (2013).
- [24] Ma J., Gan C., Xu Q., Zhou J. and Zhang J., “Amphiphilic copolymer stabilized core-shell structural casein-based emulsion”, *Colloids Surf. A*, 471: 65–72, (2015).

- [25] Bückmann F., Overbeek A. and Nabuurs T., "Self-crosslinking surfactant free acrylic dispersions", *Eur. Coat. J.*, 53: 1-8, (2001).
- [26] Chern C. S., "Principles and Applications of Emulsion Polymerization", John Wiley & Sons, USA, (2008).
- [27] Leather - Physical and mechanical tests- Sample preparation and conditioning, ISO 2419:2012 (IULTCS/IUP 1, IULTCS/IUP 3).
- [28] Leather - Determination of flex resistance - Part 1: Flexometer method, ISO 5402-1:2011 (IULTCS/IUP 20-1).
- [29] Leather - Tests for colour fastness - Colour fastness to cycles of to-and-fro rubbing, ISO 11640:2012 (IULTCS/IUP 450).
- [30] Leather --Tests for colour fastness - Colour fastness to water spotting, ISO 15700:1998 (IULTCS/IUP 420).
- [31] Amalvy J. I., "Semicontinuous emulsion polymerization of methyl methacrylate, ethyl acrylate, and methacrylic acid", *J. Appl. Polym. Sci.*, 59: 339-344, (1996).
- [32] Quadrat O. and Snuparek J., "Structure and flow properties of lattices containing carboxylic groups", *Prog. Org. Coat.*, 18: 207-228, (1990).
- [33] Karunasena A. and Glass J., "Interactions in associative thickener/220 nm methyl methacrylate latex dispersions", *Prog. Org. Coat.*, 17: 301-320, (1989).
- [34] Koh A. Y. C., Mange S., Bothe M., Leyrer R. J. and Gilbert R. G., "The influence of copolymerization with methacrylic acid on poly(butyl acrylate) film properties", *Polymer*, 47: 1159-1165, (2006).
- [35] Kang K., Kan C., Du Y. and Liu D., "Study on soap-free p(MMA-EA-AA or MAA) latex particles with narrow size distribution", *Polym. Adv. Technol.*, 17: 193-198, (2006).
- [36] van Herk A. and Gilbert B., "Emulsion Polymerization", van Herk, A (ed.), Chemistry and Technology of Emulsion Polymerization, *Blackwell Publishing Ltd.*, UK, (2005).





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

**Kam makarasının dış çap yüzey taşlama işleminde etkili olan faktörlerin deney tasarımı kullanılarak en iyilenmesi**

*Optimization of the factors that are critical in external surface grinding of roller followers using design of experiments*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Ezgi GÜNAY<sup>1</sup>, Mustafa YURDAKUL<sup>2</sup>, Yusuf Tansel İÇ<sup>3</sup>, Hacı Veli MIZRAK<sup>4</sup>, Serkan GÜNEŞ<sup>5</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-8468-6465

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-1562-5738

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0001-9274-7467

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0002-4291-7648

ORCID<sup>5</sup>: 0000-0003-3976-0771

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Günay E., Yurdakul M., İç, Y. T., Mızrak H. V, ve Güneş S., “Kam makarasının dış çap yüzey taşlama işleminde etkili olan faktörlerin deney tasarımı kullanılarak en iyilenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 27-37, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.389264

# Kam Makarasının Dış Çap Yüzey Taşlama İşleminde Etkili Olan Faktörlerin Deney Tasarımı Kullanılarak En İyilenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Ezgi GÜNAY<sup>1</sup>, Mustafa YURDAKUL<sup>1</sup>, Yusuf Tansel İÇ<sup>2\*</sup>, Hacı Veli MIZRAK<sup>3</sup>, Serkan GÜNEŞ<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Başkent Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Taşlama Montaj Birimi, Ortadoğu Rulmana Sanayi ve Tic. A.Ş., Türkiye.

(Geliş/Received :13.11.2016 ; Kabul/Accepted :03.03.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada içten yanmalı motorlarda supap tahrik mekanizması sisteminde yer alan itici düzeneğinde kullanılan kam makaralarına bitirme işlemi olarak uygulanan taşlama prosesi sonucu elde edilen yüzey değerlerinin en iyilenmesi amaçlanmıştır. Taşlamada kam makaralarından, hem müşteri isteklerini, hem de belirlenen spesifik kalite beklentilerini karşılayacak en iyi yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ve çevrim süresinin elde edilmesi beklenmektedir. Bunları tespit edebilmek için 2k faktöriyel (2 seviyeli tam faktöriyel tasarım) deney tasarımı metodolojisinden faydalanılmıştır.

Gerçekleştirilen deney tasarımı çalışmasında; ilk olarak iki farklı yüzey pürüzlülük değeri ile işlem çevrim süresinin en küçüklenmesinde etkili olan değişkenler belirlenmiş, ardından yüzey pürüzlülük değerleri ve çevrim süresini eş zamanlı olarak istenen düzeyde sağlayabilecek değişken değerlerinin belirlenmesi için çok amaçlı en iyileme işlemi gerçekleştirilmiştir. En iyileme sonucunda motor performansında çok önemli parçalardan biri olan ve belirli bir sınır değerinde yüzey pürüzlülüğü gerektiren kam makarasının çalışma performansını artıracak şekilde pürüzlülük değerlerine ve daha düşük çevrim süresine ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Taşlama, talaşlı imalat, kam makarası, yüzey pürüzlülüğü, deney tasarımı, optimizasyon.

## Optimization of the Factors That are Critical in External Surface Grinding of Roller Followers Using Design of Experiments

### ABSTRACT

In this study, it is aimed to experimentally optimize the parameters of the grinding of external surface of the roller followers which are used in internal combustion engines to operate the inlet and exhaust valves. 2k factorial experimental design methodology is applied to optimize the grinding process such that after this last finishing operation the rollers' external surface quality and cycle time meets the customers' special and strict requirements. In the application of the experimental design methodology, the critical parameters that are important in the optimization of two different surface roughness values along with cycle time are first determined. Then, the values of critical parameters are calculated with the application of the multi-objective optimization of the two surface roughness measures and cycle time. As a result of the optimization, the surface roughness values that are important in the working of the roller followers and cycle time are improved.

**Keywords:** Grinding, machining operation, roller follower, surface roughness, design of experiment, optimization.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Taşlama işlemi genel olarak sert aşındırıcılarla parça üzerinden talaş kaldırarak gerçekleştirilen yüzey düzeltme ve temizleme işlemi olarak tanımlanabilir [1,2]. Taşlama işlemi günümüzde hassas yüzey kalitesi ve iyi toleransların istenildiği uzay teknolojisi, otomotiv, savunma sanayi, taşımacılık, medikal parça imalatı ve elektronik parça imalatında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [3,4]. Kızaklar, kayıtlar, dişli çarklar, merdaneler, yataklar, bilezikler ve ölçü aletleri gibi

sürtünmenin en aza indirilmesinin gerektiği ve ölçü tamlığı, dairesellik, yüzey kalitesi ve görünümlerin önemli olduğu parçalarda taşlama işlemi özellikle tercih edilir. Ancak, taşlama işleminde herhangi bir talaşlı imalat işleminde olduğu gibi en yüksek üretim hızı ile birlikte en iyi yüzey kalitesinin elde edilmesini doğrudan etkileyen aşındırıcı taş cinsi gibi kontrol edilebilen ve edilemeyen çok sayıda değişken parametre bulunmaktadır [5-6]. Bu parametreler hem tek başlarına, hem de birbirleri ile etkileşimli olarak taşlama işlemine etki etmektedir. Parametre değerlerinin doğru olmaması durumunda istenen yüzey kalitesi elde edilemeyecek ve parça yüzeyini gereken hassasiyete ulaştırmak için

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

düzeltilici ek işlem gerekecektir. Ek işlem, istenmeyen bir maliyet ve zaman kaybı demektir [4].

Literatürde taşlama işleminin iyileştirilmesiyle ilgili çok sayıda çalışmaya rastlanmaktadır [7-20]. Bu çalışmalarda genel olarak yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesine yönelik olarak gerçekleştirilen ve malzeme-yöntem- tezgah unsurlarının bitirme işlemi üzerindeki etkileri tartışılmaktadır. Makalenin konusu olan taşlama işleminin en iyilenmesi ile ilgili olarak ise deney tasarımının kullanıldığı çalışmalar da literatürde bulunmaktadır. Örneğin, Jae-Seab ve diğerleri [21] cevap yüzeyi yöntemi kullanarak sertleştirilmiş SCM440 çeliğinin silindirik taşlanmasında yüzey pürüzlülüğü ve taşlama kuvvetlerini araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda cevap yüzeyi yöntemi ile elde edilen matematiksel modelin taşlama sırasında doğru taşlama şartlarının belirlenmesine yardımcı olacağı belirtilmiştir.

Shaji ve Radhakrishnan [22] yüzey taşlama işleminde yağlayıcı olarak grafit kullanımıyla yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi için Taguchi deney tasarımı yöntemini kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada; grafit yardımıyla taşlama işlemi ile soğutucu yardımıyla gerçekleştirilen taşlama işlemi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları karşılaştırılmıştır. Dhavlikar vd. [23] ise dış silindirik taşlama işleminde yüzey yuvarlanma hatalarının en aza indirilmesi amacıyla bütünlük Taguchi ve ikil (dual) yanıt metodolojilerinin kullanıldığı bir çalışma sunmuşlardır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Monte Carlo benzetim tekniğinden yararlanılarak yüzey hatalarını en küçükleyen faktör seviyeleri tespit edilmiştir. Krajnik vd. [24] ise iç silindirik taşlama işleminde yüzey pürüzlülüğünü azaltmak amacıyla yüzey pürüzlülüğüne etki eden faktörlerin en iyi seviyelerini bulmaya yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda, cevap yüzeyi yöntemi kullanılarak bir regresyon eşitliği elde edilmiş, ardından bu eşitlik tek amaçlı en iyileme modelinin amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Doğrusal olmayan matematiksel model bir sezgisel algoritma olan genetik algoritma üzerinden çözülmüş ve optimal faktör seviyeleri tespit edilmiştir. Agarwal [25], taşlama işleminde yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi, yüzey bozulmalarının azaltılması ve daha iyi talaş kaldırma oranını elde etmek şeklinde üç amaçlı en iyileme işlemi gerçekleştirerek üç amaç için uygun taşlama faktörleri seviyelerini belirlemiştir. İkinci dereceden cevap yüzeyi yöntemi kullanılarak oluşturulan çok amaçlı matematiksel modelin çözümünde genetik algoritmadan faydalandığı belirlenmiştir. Rudrapati vd. [26], cevap yüzeyi metodunu kullanarak iç silindirik taşlama işleminde titreşim ve yüzey pürüzlülüğü olarak belirlenen iki amacı eniyileyecek faktör seviyelerinin tespit edilmesine yönelik bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çok amaçlı en iyileme işlemi için genetik algoritmanın kullanıldığı bir sezgisel en iyileme uygulaması araştırma içeriğinde sunulmuştur. Günay ve Mızrak makaralar için yaptıkları çalışmalarında deney tasarımı metodu kullanarak deneyler gerçekleştirmişler ve bu deneyler

sonucunda buldukları optimum değerler ile hedeflenen yüzey pürüzlülük değerine ulaşmışlardır [27].

Bu çalışma yapılmadan önce çalışmanın gerçekleştirildiği firmada izofiniş operasyonu sonrasında dış çap yüzey pürüzlülüğü (Ra) 0,200µm ile 0,300µm olan parçalar müşteriye gönderilebiliyordu. Bu parçaların motorda kullanımında ise motor arızalanma problemi gözlemlenebilmekte ve dolayısıyla imalatçı firma ilave maliyete katlanmak suretiyle olumsuz şekilde etkilenmekteydi. Çalışmamızda bu hususların giderilmesini temin etmek için, iki farklı yüzey kalitesi ölçüm değeri (Ra ve Rvk) taşlama çevrim süresi ile eş zamanlı olarak en iyileme işlemine tabi tutularak hem taşlama işleminden beklenen kalite seviyesi en iyilenecek, hem de işlem süresinin azaltılması sonucu yıllık üretim miktarı artırılabilir.

## 2. KAM MAKARASI MALZEMESİ VE YÜZEY KALİTESİ (CAM FOLLOWER MATERIAL AND SURFACE QUALITY)

Kam makaraları (Şekil 1 a,b) gemi motorlarının ve kojenerasyon tesislerinde kullanılan motorların külbütör mekanizmasında kullanılan ve kam mili üzerinde çalışıp emme ve egzoz subaplarını tahrik ederek açılma kapanma zamanlarını yöneten parçalardır. Kam makaraları motor içerisinde külbütör mekanizmasının hareketini yönetmektedir. Bu makaralarda 60 - 62 HRC sertlik değeri tormalama işleminden sonra ısı işlem yapılarak verilir ve taşlama sonrasında da parça bu sertlikte kalmalıdır. Parçanın belirlenen sertlikte kalması vardiya içerisinde rutin kontrollerde yanık kontrolleri yaparak sağlanmaktadır. Eğer taşlama bölgesi yeteri kadar soğutulmazsa iki tip taşlama yanığı (a) Yeniden meniveşleme yanığı (bu yanıkta iş parçasının işlenen yüzeyinin sıcaklığı yeteri kadar soğutulmayıp meniveşleme sıcaklığına ulaşırsa (200- 205 °C civarı) bu durumda parçanın yüzey sertliği bir miktar düşer ve düşük sertlikte makaranın müşteriye gönderilmesi mümkün değildir) ile (b) Yeniden sertleştirme yanığı (bu yanık türünde ise iş parçasının yüzeyi yeteri kadar soğutulmayıp yüzey sıcaklığı 800°C seviyelerine anlık olarak gelse bile taşlama yanığı oluşmaktadır. Bu yanık ise makara sertliğini ciddi şekilde düşürmekte ve çalıştığı yerde çok hızlı bozulmaya uğramasına sebebiyet vermektedir) oluşur. Sonuç olarak, taşlama sırasında iş parçasında sertliği düşüren hiçbir yanığın olmaması gerekmektedir. Yanık oluşması tespit edilmesi durumunda, yanığın oluşmadığı bir önceki kontrole kadar olan tüm parçalar karantinaya ayrılır ve tek tek kontrolden geçirilir. Kam makara malzemesi olarak 100Cr6 rulman çeliği kullanılmaktadır (Çizelge1).



Şekil 1. a) Kam makarasının boyutları (Cam roller dimensions), b) Kam makarası itici gövdesine montajlı hali (Mounting of the cam pulley on the propulsive body)

Çizelge 1. DIN 100Cr6 rulman çeliği kimyasal ve mekanik özellikleri (Chemical and mechanical properties of DIN 100Cr6 bearing steel)

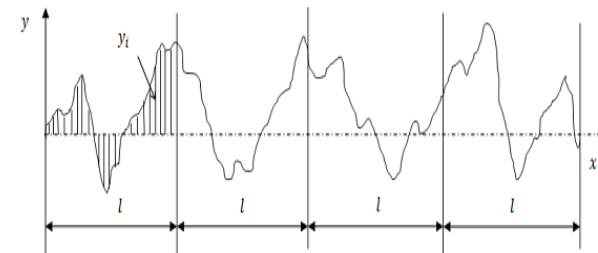
Kimyasal Özellikler				
C	Si	Mn	P	
0,93-1,05	0,15-	0,25-0,45	0-0,025	
S	Al	Cr	Cu	Mo
0-0,015	0-0,05	1,35-1,60	0-0,30	0-0,10
Mekanik Özellikler				
Özellik		Değer		
Kayma modülü		80 GPa		
Elastiklik modülü		190-210 GPa		
Poisson oranı		0,27-0,30		
Özellik		Değer		
Yoğunluk		7,81 g/cm <sup>3</sup>		
Erime noktası		1424 °C		
Krtik çekme dayanımı		228 kgf/mm <sup>2</sup>		

Külbütör mekanizmasının temel görevi; eksantrik milinden aldığı hareketle silindirlere emme ve egzoz zamanlarının oluşması için supapların açılmasını ve diğer sıkıştırma ve iş zamanlarında ise kapalı kalmasını sağlamaktır. Söz konusu makaralar kam mili ile çalıştığı için temas yüzeyinin pürüzlülük değerinin tercihen düşük olması, supapların boşluksuz kapanmaları ve açılmaları için bir gerekliliktir. Bu nedenle motorun çalışması için kam makarasının yüzeylerinin taşlama işlemi ile pürüzlülük değerlerinin en aza indirilmesi oldukça önemlidir.

Talaş kaldırarak işleme sırasında; seçilen yonteme, kesici cinsine ve işleme parametre değerlerine bağlı olarak fiziksel, kimyasal, ısı faktörlerin ve kesici-iş parçası arasındaki mekanik hareketlerin etkisi ile işlenen yüzeylerde genellikle istenmediği halde işleme izleri oluşmaktadır. Nominal yüzey çizgisinin (profil ortalama çizgisi) altında ve üstünde düzensiz sapmalar meydana getiren bu duruma yüzey pürüzlülüğü denmektedir. Yüzey kalitesinin değerlendirilmesi ve matematiksel büyüklüklere çevrilmesi için pürüzlülük değerlerinin ölçülmesi gerekir. Günümüzde bu ölçümleri yeterli doğrulukla, hassasiyetle ve kısa sürede gerçekleştiren cihazlar; temaslı ölçüm yapan induktifprolu yüzey pürüzlülük cihazlarıdır. Pürüzlülük ölçümünün doğru ve hassas yapılması ile aynı zamanda hangi pürüzlülük ölçütlerinin kullanılacağına doğru tespiti ve bunların doğru değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Yüzey pürüzlülüğü standarda göre yüzeye dik olan bir kesitte, pürüzlülük yüksekliği boyunca belirlenmiş bir profilin ortalama çizgisine göre tayin edilir [28]. Yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde literatürde en çok ideal bir yüzey profilinden sapmaların aritmetik ortalaması şeklinde tanımlanan (Şekil 2) ortalama pürüzlülük (Ra) kullanılmaktadır [28]. Ra değeri aşağıda verilen eşitlikle hesaplanabilir:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (1)$$

$$R_a = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n |y_i|) \quad (2)$$



Şekil 2. Ortalama pürüzlülük gösterimi (Average roughness illustration)

Çalışmada dikkate alınan ve önemli bir diğer yüzey pürüzlülük göstergesi, Şekil 3'te verildiği gibi ideal yüzey profilinden içeri doğru uzanan ve vadiyi andıran bir şekle sahip olan derinliklerin ortalaması olarak hesaplanan Ortalama Vadi Yüzey Derinliğidir (Rvk). Bu pürüzlülük değeri işlenmiş yüzeyden içeri doğru oluşan vadiler sayesinde yüzeyin yağ tutma kapasitesini gösterir ve Eşitlik 3 ile hesaplanır. Eşitlikte, n örneklem sayısını ifade etmektedir. Şekil 3'te verilen örnek için;

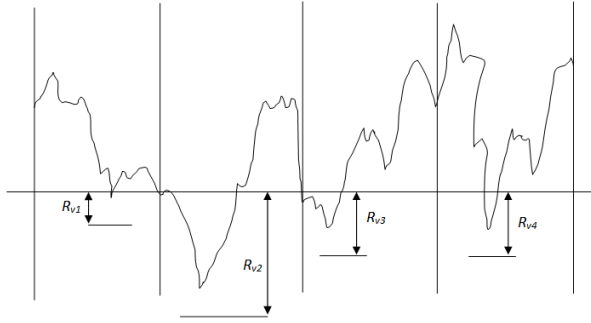
$$R_{vk} = (R_{v1} + R_{v2} + R_{v3} + R_{v4}) / 4 \quad (3)$$

olarak hesaplanır ve;

$$R_{vk} = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n R_{vi}) \quad (4)$$

Şeklinde ifade edilir [27]. Taşlama sonucu beklentiler, kam makarasının kullanımı sırasında yüzeyin aşınmasına ve ısınmasına yol açan sürtünmeyi en aza indirmek ve yüzey üzerinde kayganlığı artıran ve ısıyı yüzeyden uzaklaştıran yağı yüzeyde vadiler içinde tutma

kabiliyetini arttırmaktır. Bu iki hedef yukarıda açıklanan ortalama yüzey pürüzlülük ve ortalama yüzey vadi süresinin azaltılması üretim hızının artması hedefini sağlayacaktır.



Şekil 3.  $R_{vk}$ 'nın bir örnek yüzey profili üzerinde gösterimi (Impressions on a sample surface profile of  $R_{vk}$ )

yükseklik ölçümleri ile değerlendirilecektir. Bu iki yüzey pürüzlülük değeri ile beraber tezgahdaki çevrim

kullanılarak açılan ekranda gerekli parametre sayısı ve alt-üst sınır değerleri, tekrar sayısı belirtildikten sonra otomatik olarak elde edilmiştir. Elde edilen deney planı Çizelge 3'te sunulmuştur. Bu deney kombinasyonuna göre toplamda 96 adet (1/2 kesirli:  $2^6-1=32$  adet deney kombinasyonu ve 3 tekrarlı) deney gerçekleştirilmiştir. Deneyler için Toyo 11LA88 Silindirik Dış Yüzey Taşlama Makinası (Şekil 4) kullanılmıştır.

### 3.2. Ölçümler

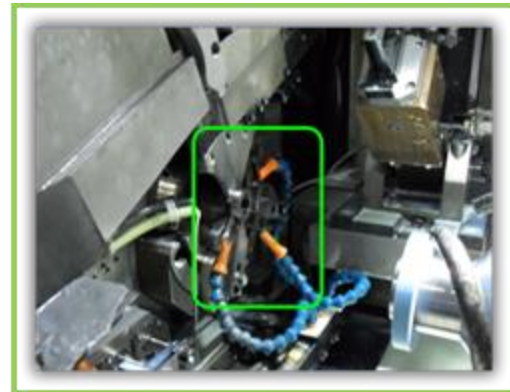
İşlenen parçaların  $R_a$  ve  $R_{vk}$  değerleri, temas uçlu ölçme sistemine sahip Taylor Hobson Form TalySurf PGI 1230 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Bu cihaz, programı doğrultusunda parça dış çap yüzeylerinden doğrusal

Çizelge 2. Faktörler ve alt-üst seviyeleri (Factors and upper and lower levels)

Faktör	Kısaltma	Değişken	AltSeviye*	ÜstSeviye
Elmaslama (taş bileme) hızı (m/d)	ELMHIZ	$x_1$	0,080	0,350
İş kafası devri (dev/d)	İSKDEV	$x_2$	710	930
Kesme hızı (mm/s)	KESHIZ	$x_3$	45	55
İlerleme hızı (mm/Ø/s)**	İLHIZ	$x_4$	0,015	0,25
Finish spark-out (kivılcım kesilme) süresi (s)	FSOUT	$x_5$	2	3,5
Sıvı basıncı (bar)	BASINÇ	$x_6$	3	5

\*Başlangıç koşulu

\*\* Makinanın işlediği çapta saniyede aldığı mm değerinde yol (Ø: Çap)



Şekil 4. Taş kafası, elmaslama ünitesi ve parçanın bağlanmış görüntüsü (Stone head, diamond unit and attached image of the piece)

## 3. UYGULAMA (APPLICATION)

### 3.1. Deney Planının Oluşturulması

Taşlamada etkili olan 6 adet faktör (Çizelge 2) seçilerek oluşturulan 3 tekrarlı deney tasarım kombinasyonu MINITAB paket programı yardımıyla "Stat/DOE/Factorial/Create factorial design" sekmesi

ölçümler gerçekleştirerek yüzey pürüzlülük değerlerini belirlemektedir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve çevrim süre değerleri Çizelge 3'te sunulmuştur.

**Çizelge 3.** İlk 20 ve son 16 deneyin sonuçları (96 deneyden) (Results of the first 20 and the last 16 trials (from 96 experiments))

Deney No	Faktör seviyelerinden oluşan deney kombinasyonları						Deneyler sonucunda elde edilen ölçüm değerleri		
	ELMHIZ (m/d)	ISKDEV (dev/d)	KESHIZ (mm/s)	ILHIZ (mmØ/s)	FSOUT (s)	BASINÇ (bar)	R <sub>a</sub> (µm)	R <sub>vk</sub> (µm)	ÇevrimSüresi (s)
1	0,08	710	45	0,015	2	3	0,314	0,4501	13,69
2	0,35	710	45	0,015	2	5	0,154	0,231	13,66
3	0,08	930	45	0,015	2	5	0,112	0,156	14,01
4	0,35	930	45	0,015	2	3	0,148	0,213	13,25
5	0,08	710	55	0,015	2	5	0,1237	0,1834	14,4
6	0,35	710	55	0,015	2	3	0,1767	0,1907	14,37
7	0,08	930	55	0,015	2	3	0,1271	0,1645	15,15
8	0,35	930	55	0,015	2	5	0,199	0,266	12,59
9	0,08	710	45	0,025	2	5	0,1183	0,1692	14,66
10	0,35	710	45	0,025	2	3	0,1519	0,2714	13,77
11	0,08	930	45	0,025	2	3	0,0893	0,1224	13,89
12	0,35	930	45	0,025	2	5	0,1836	0,2842	13,38
13	0,08	710	55	0,025	2	3	0,0929	0,124	16,05
14	0,35	710	55	0,025	2	5	0,1576	0,2425	14,95
15	0,08	930	55	0,025	2	5	0,1154	0,167	17,26
16	0,35	930	55	0,025	2	3	0,1983	0,2397	14,7
17	0,08	710	45	0,015	3,5	5	0,1022	0,1613	15,87
18	0,35	710	45	0,015	3,5	3	0,1376	0,203	16,1
19	0,08	930	45	0,015	3,5	3	0,1043	0,1512	15,11
20	0,35	930	45	0,015	3,5	5	0,1636	0,253	15,98
						...			
81	0,08	710	45	0,015	3,5	5	0,1022	0,1567	15,88
82	0,35	710	45	0,015	3,5	3	0,1289	0,1678	15,77
83	0,08	930	45	0,015	3,5	3	0,0933	0,1331	16,55
84	0,35	930	45	0,015	3,5	5	0,1589	0,2416	15,08
85	0,08	710	55	0,015	3,5	3	0,0953	0,1536	16,8
86	0,35	710	55	0,015	3,5	5	0,1148	0,1763	16,27
87	0,08	930	55	0,015	3,5	5	0,1814	0,2516	16,06
88	0,35	930	55	0,015	3,5	3	0,1915	0,2892	15,46
89	0,08	710	45	0,025	3,5	3	0,2308	0,3642	15,59
90	0,35	710	45	0,025	3,5	5	0,2211	0,3534	14,97
91	0,08	930	45	0,025	3,5	5	0,2753	0,4118	15,18
92	0,35	930	45	0,025	3,5	3	0,2726	0,4485	14,99
93	0,08	710	55	0,025	3,5	5	0,1506	0,2082	14,85
94	0,35	710	55	0,025	3,5	3	0,1655	0,1923	15,79
95	0,08	930	55	0,025	3,5	3	0,1044	0,136	16,68
96	0,35	930	55	0,025	3,5	5	0,1219	0,1955	15,86

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Çizelge 4’de %95 güven düzeyinde ISKDEV faktörü dışındaki tüm parametrelerin ortalama yüzey pürüzlülüğünde etkili olduğu görülmektedir. Yine ikili ve üçlü faktör etkileşimleri değerlendirildiğinde etkili olan faktör etkileşimleri de Çizelge 4’de koyu renkli olarak belirtilmiştir.

Buna göre Ra için etkili ana parametreler ELMHIZ, KESHIZ, ILHIZ, FSOUT ve BASINÇ olarak tespit edilmektedir. Gerçekleştirilen deneylerin analizi sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü için elde edilen ANOVA tablosu ise Çizelge 5’de verilmiştir

**Çizelge 4.** MINITAB program çıktısı olarak elde edilen  $R_a$  için öngörülen etkili faktörler ve katsayıları (Effective factors and coefficients for  $R_a$  obtained as MINITAB program output)

Terim	Etki	Katsayı	SE Katsayı	T	P
<b>Sabit</b>		<b>0,12374</b>	<b>0,007553</b>	<b>16,38</b>	<b>0,000</b>
<b>ELMHIZ</b>	<b>0,02779</b>	<b>0,01389</b>	<b>0,001724</b>	<b>8,06</b>	<b>0,000</b>
ISKDEV	0,00011	0,00006	0,001724	0,03	0,974
<b>KESHIZ</b>	<b>-0,03077</b>	<b>-0,01538</b>	<b>0,001724</b>	<b>-8,92</b>	<b>0,000</b>
<b>ILHIZ</b>	<b>0,01709</b>	<b>0,00855</b>	<b>0,001724</b>	<b>4,96</b>	<b>0,000</b>
<b>FSOUT</b>	<b>0,01738</b>	<b>0,00869</b>	<b>0,001724</b>	<b>5,04</b>	<b>0,000</b>
<b>BASINC</b>	<b>-0,00826</b>	<b>-0,00413</b>	<b>0,001724</b>	<b>-2,40</b>	<b>0,019</b>
<b>ELMHIZ*ISKDEV</b>	<b>0,02336</b>	<b>0,01168</b>	<b>0,001724</b>	<b>6,77</b>	<b>0,000</b>
<b>ELMHIZ*KESHIZ</b>	<b>0,02087</b>	<b>0,01044</b>	<b>0,001724</b>	<b>6,05</b>	<b>0,000</b>
ELMHIZ*ILHIZ	0,00362	0,00181	0,001724	1,05	0,298
ELMHIZ*FSOUT	-0,00659	-0,00329	0,001724	-1,91	0,060
ELMHIZ*BASINC	-0,00474	-0,00237	0,001724	-1,38	0,173
<b>ISKDEV*KESHIZ</b>	<b>0,01298</b>	<b>0,00649</b>	<b>0,001724</b>	<b>3,76</b>	<b>0,000</b>
ISKDEV*ILHIZ	0,00301	0,00151	0,001724	0,87	0,385
<b>ISKDEV*FSOUT</b>	<b>0,00822</b>	<b>0,00411</b>	<b>0,001724</b>	<b>2,38</b>	<b>0,020</b>
<b>ISKDEV*BASINC</b>	<b>0,01753</b>	<b>0,00876</b>	<b>0,001724</b>	<b>5,08</b>	<b>0,000</b>
<b>KESHIZ*ILHIZ</b>	<b>-0,02955</b>	<b>-0,01478</b>	<b>0,001724</b>	<b>-8,57</b>	<b>0,000</b>
<b>KESHIZ*FSOUT</b>	<b>-0,02131</b>	<b>-0,01065</b>	<b>0,001724</b>	<b>-6,18</b>	<b>0,000</b>
KESHIZ*BASINC	0,00537	0,00268	0,001724	1,56	0,124
<b>ILHIZ*FSOUT</b>	<b>0,04641</b>	<b>0,02321</b>	<b>0,001724</b>	<b>13,46</b>	<b>0,000</b>
<b>ILHIZ*BASINC</b>	<b>0,00716</b>	<b>0,00358</b>	<b>0,001724</b>	<b>2,08</b>	<b>0,042</b>
<b>FSOUT*BASINC</b>	<b>0,01017</b>	<b>0,00508</b>	<b>0,001724</b>	<b>2,95</b>	<b>0,004</b>
<b>ELMHIZ*ISKDEV*KESHIZ</b>	<b>-0,01461</b>	<b>-0,00731</b>	<b>0,001724</b>	<b>-4,24</b>	<b>0,000</b>
<b>ELMHIZ*ISKDEV*ILHIZ</b>	<b>-0,01104</b>	<b>-0,00552</b>	<b>0,001724</b>	<b>-3,20</b>	<b>0,002</b>
<b>ELMHIZ*KESHIZ*ILHIZ</b>	<b>-0,00849</b>	<b>-0,00425</b>	<b>0,001724</b>	<b>-2,46</b>	<b>0,016</b>
<b>ELMHIZ*ISKDEV*FSOUT</b>	<b>-0,00995</b>	<b>-0,00497</b>	<b>0,001724</b>	<b>-2,89</b>	<b>0,005</b>
<b>ELMHIZ*KESHIZ*FSOUT</b>	<b>-0,00731</b>	<b>-0,00365</b>	<b>0,001724</b>	<b>-2,12</b>	<b>0,038</b>
<b>ELMHIZ*ILHIZ*FSOUT</b>	<b>-0,02634</b>	<b>-0,01317</b>	<b>0,001724</b>	<b>-7,64</b>	<b>0,000</b>
<b>ELMHIZ*ISKDEV*BASINC</b>	<b>-0,04314</b>	<b>-0,02157</b>	<b>0,001724</b>	<b>-12,51</b>	<b>0,000</b>
<b>ELMHIZ*KESHIZ*BASINC</b>	<b>-0,02348</b>	<b>-0,01174</b>	<b>0,001724</b>	<b>-6,81</b>	<b>0,000</b>
<b>ELMHIZ*ILHIZ*BASINC</b>	<b>-0,02129</b>	<b>-0,01065</b>	<b>0,001724</b>	<b>-6,18</b>	<b>0,000</b>
<b>ELMHIZ*FSOUT*BASINC</b>	<b>-0,02686</b>	<b>-0,01343</b>	<b>0,001724</b>	<b>-7,79</b>	<b>0,000</b>
<b>ELMHIZ*ISKDEV*KESHIZ*ILHIZ*FSOUT* BASINC</b>	<b>0,07518</b>	<b>0,03759</b>	<b>0,007747</b>	<b>4,85</b>	<b>0,000</b>

S = 0,0168893 R-Sq = 94,05% R-Sq(adj) = 91,25%

**Çizelge 5.** MINITAB programı çıktısı olarak elde edilen  $R_a$  için varyans analizi (ANOVA) tablosu ( Statistical analysis of variance (ANOVA) for  $R_a$  obtained as MINITAB program output)

Kaynak	SD	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
<b>Ana Etkiler</b>	<b>6</b>	<b>0,057151</b>	<b>0,057151</b>	<b>0,0095252</b>	<b>33,39</b>	<b>0,000</b>
<b>2- yönlü etkileşim</b>	<b>15</b>	<b>0,126658</b>	<b>0,126658</b>	<b>0,0084439</b>	<b>29,60</b>	<b>0,000</b>
<b>3- yönlü etkileşim</b>	<b>10</b>	<b>0,116176</b>	<b>0,116176</b>	<b>0,0116176</b>	<b>40,73</b>	<b>0,000</b>
<b>6- yönlü etkileşim</b>	<b>1</b>	<b>0,006715</b>	<b>0,006715</b>	<b>0,0067154</b>	<b>23,54</b>	<b>0,000</b>
Artık hata	68	0,019397	0,019397	0,0002852		
Hata	68	0,019397	0,019397	0,0002852		
Toplam	100	0,326098				

SD: Serbestlik Derecesi; Sq SS: Kareler Toplamı; Adj SS: Düzeltilmiş Kareler Toplamı; Adj MS: Düzeltilmiş Kareler Ortalaması

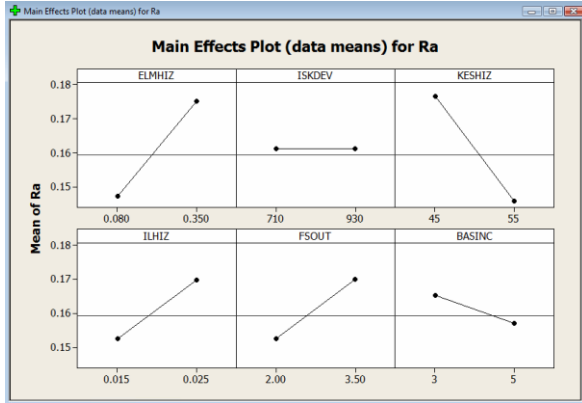
Diğer yanıtlar için tespit edilen etkili faktörler ise Rvk için KESHIZ, ILHIZ, FSOUT; Çevrim Süresi için ELMHIZ, KESHIZ, FSOUT, BASINC olmuştur. Rvk ve Çevrim Süresi için elde edilen ANOVA tabloları Ek-1'de sunulmuştur.

#### 4.1. Ana Faktörlerdeki Değişimlerin Yanıtlar Üzerindeki Etkileri

Ana faktörlerin  $R_a$  üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde ELMHIZ, ILHIZ, FSOUT

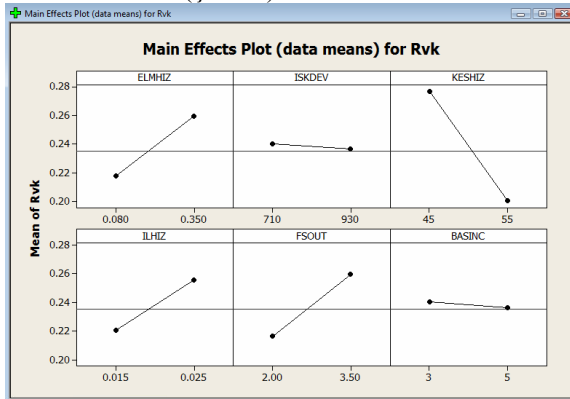
faktörlerinin artışı ortalama  $R_a$  değerini olumsuz yönde etkileyerek artışına neden olmaktadır. Bununla birlikte KESHIZ ve BASINC faktörlerindeki artışlar ortalama  $R_a$  değerini düşürmektedir.

ISKDEV kriterindeki artışın ise ortalama  $R_a$  değerinin değişimi üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı görülmektedir (Şekil 5).

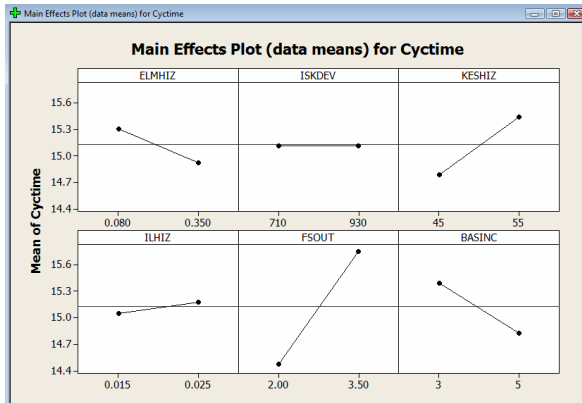


Şekil 5. Ana faktörlerdeki değişimlerin  $R_a$  üzerindeki etkileri (The effects of changes in main factors on  $R_a$ )

Diğer taraftan ortalama  $R_{vk}$  değeri için değerlendirme yapıldığında ELMHIZ, ILHIZ ve FSOUT faktör değerlerindeki artışlar ortalama  $R_{vk}$  değerini artırmakta; ISKDEV, KESHIZ ve BASINC faktör değerlerindeki artışlar ise  $R_{vk}$  değerini düşürmektedir (Şekil 6). Ayrıca çevrim süresi açısından bakılacak olursa KESHIZ, ILHIZ ve FSOUT faktörlerinin değerlerinin artışı ortalama çevrim süresinin artışına neden olurken, ELMHIZ ve BASINC faktör değerlerindeki artış çevrim süresini azaltıcı yönde bir etkiye sebep olmaktadır. ISKDEV faktör değerinin değişimi ise çevrim süresini etkilememektedir (Şekil 7).



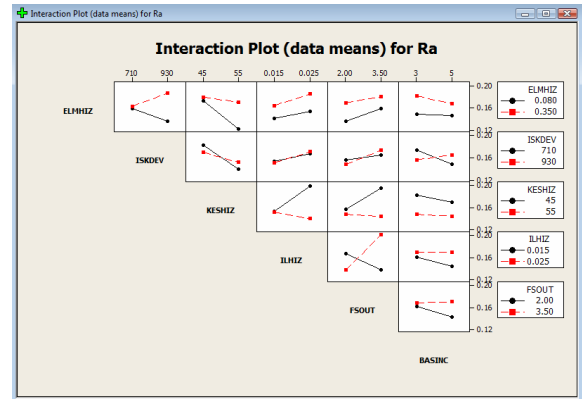
Şekil 6. Ana faktörlerdeki değişimlerin  $R_{vk}$  üzerindeki etkileri (Effects of changes in main factors on  $R_{vk}$ )



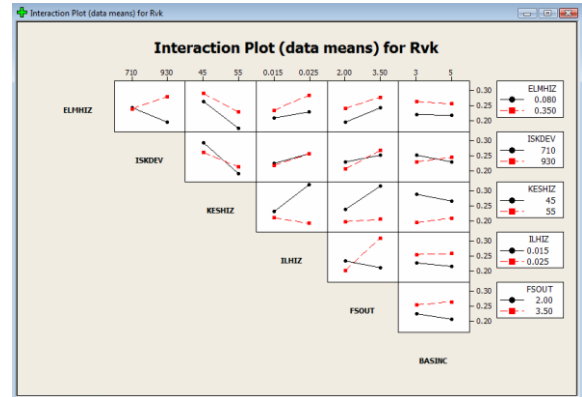
Şekil 7. Ana faktörlerdeki değişimlerin çevrim Süresi üzerindeki etkileri (Effects of changes in main factors on cycle time)

## 4.2. Faktör Etkileşimlerinin Yanıtlar Üzerindeki Etkileri

Ana faktörlerin yanıtlar üzerindeki etkilerinin ardından faktör etkileşimlerinin de yanıtlar üzerindeki etkileri de incelenmiştir. ISKDEV faktörünün alt seviyesi olan  $R_a$ 'da meydana gelen değişim ILHIZ ve FSOUT faktörlerinin her iki seviyesi için de benzer etkiye sahip olmaktadır. Bunun dışındaki tüm faktörlerde ise bir faktörün alt seviyeden üst seviyeye hareketinde diğer faktörlerin etkileri farklı sonuçlar doğurmaktadır (Şekil 8). ISKDEV faktörünün alt seviyesi olan 710 değerinden 930 değerine hareket etmesi sonucunda  $R_{vk}$ 'da meydana gelen değişim ILHIZ faktörünün her iki seviyesi için de benzer etkiye sahip olmaktadır. Bunun dışındaki tüm faktörlerde ise bir faktörün alt seviyeden üst seviyeye hareketinde diğer faktörlerin etkileri farklı sonuçlar doğurmaktadır (Şekil 9).

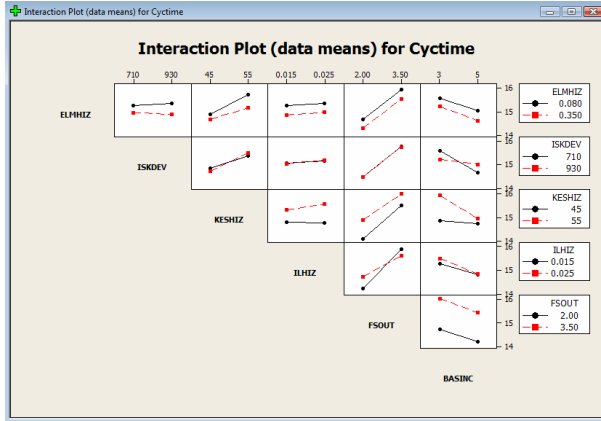


Şekil 8. Faktör etkileşimlerinin  $R_a$  üzerindeki etkileri (Factor interaction effects on  $R_a$ )



Şekil 9. Faktör etkileşimlerinin  $R_{vk}$  üzerindeki etkileri (The effects of factor interactions on  $R_{vk}$ )





Şekil 10. Faktör etkileşimlerinin çevrim süresi üzerindeki etkileri (The effects of factor interactions on cycle time)

### 4.3. Üç Yanıt İçin Regresyon Eşitlikleri

Her üç yanıt için de ANOVA analizi sonucunda  $R^2$ (adj) değerleri sırasıyla  $R_a$  için %91,25,  $R_{vk}$  için %88, ve Çevrim Süresi için %60,33 şeklinde tespit edilmiş olup, bu değerler  $R_a$  ve  $R_{vk}$  için yeterli düzeyde, Çevrim Süresi içinse tatmin edici bir değerde elde edilebilmiştir. Özellikle  $R_a$  ve  $R_{vk}$  için %85'in üzerindeki  $R^2$  (adj) değerleri dikkate alındığında her üç yanıt için de aşağıda sunulan regresyon fonksiyonlarının geçerliliklerinin yeterli olduğu söylenebilir. ANOVA tablolarında etkili ana faktörler ve faktör etkileşimleri kullanılarak her üç yanıt için de elde edilen regresyon eşitlikleri Çizelge 2'de verilen değişkenler cinsinden aşağıda sunulmaktadır:

$$(Enküçükke)R_a = 0,12374 + 0,1389x_1 + 0,00006x_2 - 0,01538x_3 + 0,00855x_4 + 0,00869x_5 - 0,00413x_6 + 0,01168x_1x_2 + 0,01044x_1x_3 + 0,00649x_2x_3 + 0,0411x_2x_5 + 0,00876x_2x_6 - 0,01478x_3x_4 - 0,01065x_3x_5 + 0,02321x_4x_5 + 0,00358x_4x_6 + 0,00508x_5x_6 - 0,00731x_1x_2x_3 - 0,00552x_1x_2x_4 - 0,00425x_1x_3x_4 - 0,00497x_1x_2x_5 - 0,00365x_1x_3x_5 - 0,01317x_1x_4x_5 - 0,02157x_1x_2x_6 - 0,01174x_1x_3x_6 - 0,01065x_1x_4x_6 - 0,01343x_1x_5x_6 + 0,03759x_1x_2x_3x_4x_5x_6 \quad (4)$$

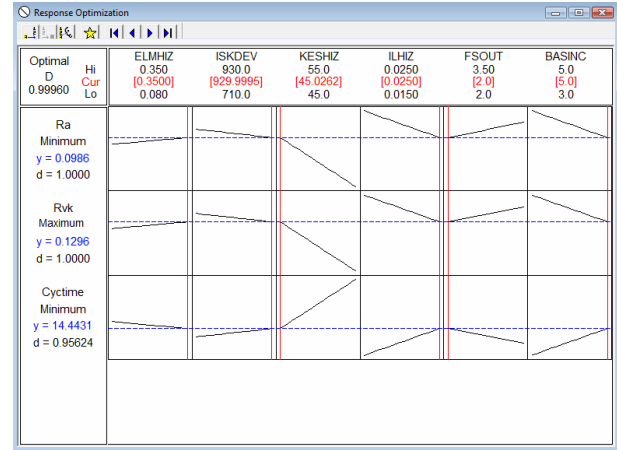
$$(Enbüyükke)R_{vk} = 0,1739 + 0,02089x_1 - 0,00177x_2 - 0,3815x_3 + 0,01764x_4 + 0,02166x_5 - 0,00212x_6 + 0,02277x_1x_2 + 0,007x_1x_3 + 0,00793x_1x_4 + 0,01403x_2x_3 + 0,00993x_2x_5 + 0,00962x_2x_6 - 0,02717x_2x_3 - 0,01763x_2x_5 + 0,00981x_2x_6 + 0,03287x_4x_5 - 0,00847x_1x_2x_3 - 0,01357x_1x_2x_4 - 0,0118x_1x_3x_4 - 0,02146x_1x_4x_5 - 0,03892x_1x_2x_6 - 0,1299x_1x_3x_6 - 0,01543x_1x_4x_6 - 0,01918x_1x_5x_6 + 0,06456x_1x_2x_3x_4x_5x_6 \quad (5)$$

$$(En küçükke)Çevrim Süresi = 15,392 - 0,1931x_1 - 0,0025x_2 + 0,3298x_3 + 0,0606x_4 + 0,6369x_5 - 0,2829x_6 + 0,1794x_2x_6 - 0,217x_3x_6 - 0,1931x_4x_5 + 0,2471x_1x_5x_6 \quad (6)$$

Eşitlikler girdi faktörleriyle yanıtlar arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ifade etmektedir. Bu eşitliklerden faydalanılarak farklı faktör seviyelerinde elde edilebilecek yanıt değerleri tahmin edilebilir.

### 4.4. En iyileme

Yukarıda bahsedildiği gibi faktörlerin değerlerindeki alt seviyeden üst seviyeye doğru hareketlerinde yanıtlar üzerinde farklı sonuçlar doğurabilmektedir. Çalışma kapsamında tüm yanıtlardan arzu edilen değerleri en iyileyecek faktör değerlerini belirlemek amacıyla çok amaçlı en iyileme gerçekleştirilmiştir. Bunun için MINITAB programındaki "Stat / DOE / Faktoriyel/ Response Optimizier" aracından faydalanılmıştır. MINITAB programındaki Response Optimizier (yanıt en iyileyici) aracı memnuniyet fonksiyonu yaklaşımını (desirability function approach) kullanmaktadır. Bu yöntemde çok amaçlı en iyilemede en iyilenecek edilecek her bir yanıt için tekil memnuniyet fonksiyonu (d) ve tüm yanıtları kapsayacak şekilde bileşik memnuniyet fonksiyonu (D: desirability) seviyesi, faktörlerin hangi kombinasyonda en iyi hedeflenen sonuç değerlerine ulaşılabileceğini tanımlamaktadır. Tekil memnuniyet fonksiyonu (d) faktörlerin tekil olarak ulaşılabileceği optimum noktayı değerlendirirken, tüm sistemin memnuniyet fonksiyonu (D) elde edilen faktör değerleriyle genel olarak sonuca ne kadar yaklaşılabildiğini gösterir. Memnuniyet seviyesi 0 ile 1 arasında bir aralığa sahiptir. "1", ideal durumu işaret ederken; "0", bir veya daha çok sonucun kabul edilebilir limitlerin dışına çıktığını belirtir. Yapılan çoklu yanıt en iyilemesi neticesinde (Şekil 11) bütünleşik memnuniyet seviyesi (D) 0,9996 olduğu için bu çalışmada belirlenen en iyi faktör değerleri ile (Şekil 10'da kırmızı yazı fontu ile belirtilen satır)  $R_a$ ,  $R_{vk}$  çevrim süresi yanıtlarının toplamda ideal duruma yakınsama durumunu göstermektedir. Yani en iyi durumu belirlenen faktör değerleriyle  $1 - 0,9996 = 0,0004$  birimlik bir sapma ile çok iyi bir düzeyde yakalanabilmiştir.



Şekil 11. Optimizasyon sonuçları (Optimization results)

Şekil 11'de üst tarafta görülen kırmızı renkli sonuçlar, elde edilen en iyi faktör değerlerini göstermektedir. Bunun anlamı; kırmızı renkli faktör değerleri süreçte çalıştırılacak olursa ortaya çıkacak yanıt değerleri yine bu grafikte satırları ifade eden alanda görülen mavi renkli "y" değerlerinin elde edileceğini gösterir.

a)  $R_a$  yanıtı için  $d=1$  yakalanabilmiştir. Bunun anlamı, tespit edilen en iyi faktör seviyeleri ile  $R_a$  değeri  $0,0986 \mu\text{m}$  değeriyle sağlanabilmiştir.

b)  $R_{vk}$  yanıtı için ise çalışma sonunda yine en iyi memnuniyet fonksiyonu elde edilebilmiştir ( $d=1$ ). Böylece  $R_{vk}$  yanıtı  $0,1296 \mu\text{m}$  değeri ile tespit edilmiştir.

c) Çevrim süresi  $14,4432$  saniye ile memnuniyet fonksiyonu değeri  $0,95623$  olarak bulunmuştur.

Çoklu yanıt en iyilemesi sonucunda yanıt en iyileyici aracı ile bulunan sonuçlar Çizelge 6'da özetlenmiştir. Yanıt en iyileyici aracından ortaya koyulan en iyi değerler için önerilen çıktı değerlerine göre işlemde başlangıç durumundaki faktör değerlerinden elde edilen  $R_a=0,25 \mu\text{m}$  değerine göre optimizasyon sonucunda  $R_a = 0,0986 \mu\text{m}$  değeri elde edilebilmektedir. Sadece ana yanıt olan  $R_a$  açısından çalışma değerlendirilecek olursa %39 seviyesinde bir iyileşme sağlanabildiği görülmektedir.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, taşlama işleminde kam makarasının yüzey pürüzlülüğü değerlerini iyileştirirken ( $R_a$ 'yien küçükleyen ve  $R_{vk}$ 'yien büyükleyen) aynı zamanda taşlama çevrim süresini en aza indiren faktör değerleri bulunmuştur. Ayrıca çalışma sonucunda her bir kalite değeri üzerinde hangi faktörlerin daha önemli olduğu ortaya konmuştur (Şekil 12-13-14). Buna göre,  $R_a$  için etkili faktörler ve etkileşimleri için çizdirilen Pareto grafiği incelendiğinde İlerleme Hızı ve Kıvılcım Kesilme Süresi (FSOUT) faktörleri arasındaki etkileşimin ortalama yüzey pürüzlülüğünde birincil öneme sahip olduğu görülmektedir (Şekil 12). Bununla birlikte grafikte ikinci önem sırasında Taş Bileme Hızı, İş Kafası Devri ve Basınç faktörlerinin etkileşimleri yer almaktadır. Üçüncü sırada ise Kesme Hızı ana faktörünün etkisi, dördüncü sırada Kesme Hızı ve İlerleme Hızı faktörünün ikili etkileşimi, beşinci sırada

**Çizelge 6.** Belirlenen optimum proses faktör değerleri ve karşılığında elde edilen yanıtlar (Determined optimum process factor values and corresponding responses)

Faktörler	Optimum faktör değerleri	Elde edilen yanıtlar
Elmaslama Hızı (taş bileme hızı) (m/d)	0,35	
Kesme Hızı (m/s)	45,0262	$R_a = 0,098 \mu\text{m}$
İş Kafası devri (dev/d)	929,9995	$R_{vk} = 0,119 \mu\text{m}$
İlerleme Hızı (mmØ/s)	0,025	Çevrim Süresi =14,4 saniye
Kıvılcım kesilme süresi (Finish Spark-Out Zamanı)	2	
Sıvı Basıncı (bar)	5	

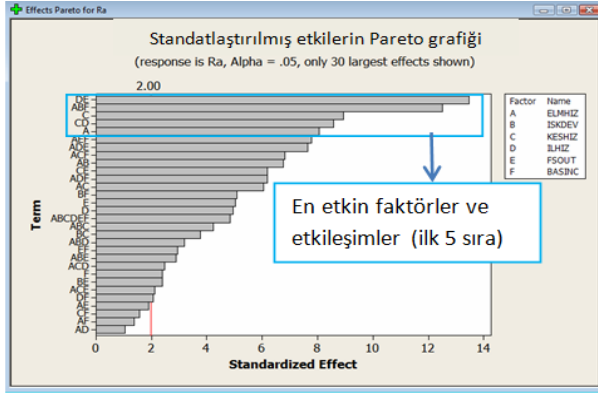
## 4.5. Doğrulama Deneyleri

Yukarıda yanıt en iyileyici aracından elde edilen optimal faktör değerlerinin doğruluğunu onaylamak için 19 adet doğrulama deneyi gerçekleştirilmiştir. Doğrulama deneyinde elde edilen yanıtlar kullanılarak gerçekleştirilen t testi ile elde edilen %95 güven düzeyindeki güven aralığı değerleri ise Çizelge 8'de verilmektedir. Bu sonuçlara göre, optimizasyon sonucunda elde edilen değerlerin doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen alt ve üst güven aralığı değerleri içerisinde elde edilebildiği gözlenmiştir

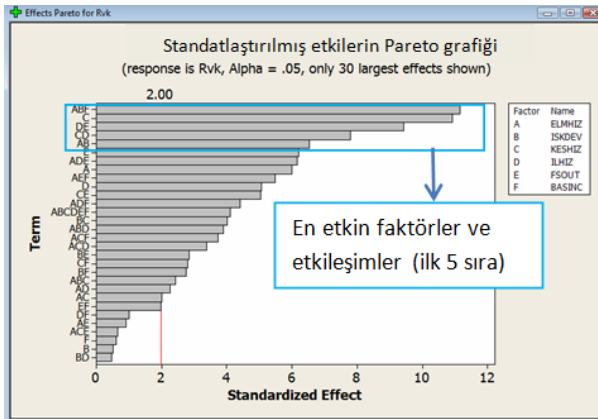
ise Taş Bileme Hızı ana faktör etkisi bulunmaktadır. Bu değerlendirmelere göre Pareto grafiğinde ilk beş sırada genel olarak hız ile ilişkili faktörlerin ve aralarındaki etkileşimlerin  $R_a$  üzerinde önemli olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Benzer sonuçlar  $R_{vk}$  için Şekil 13 ve çevrim süresi için Şekil 14 incelenerek elde edilebilir. Çalışmanın firma açısından sonuçları irdelenirse, en iyileme sonucu elde edilen parametre değerleri ile üretilen kam makaraların müşterilere yaklaşık 20.000.000 adet gönderilmiş ve çalışma öncesi olan müşteri şikâyetlerinden hiçbirinin tekrarlanmadığı görülmüştür

**Çizelge 8.** Doğrulama deneyleri ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi (Evaluation of validation experiments measurement results)

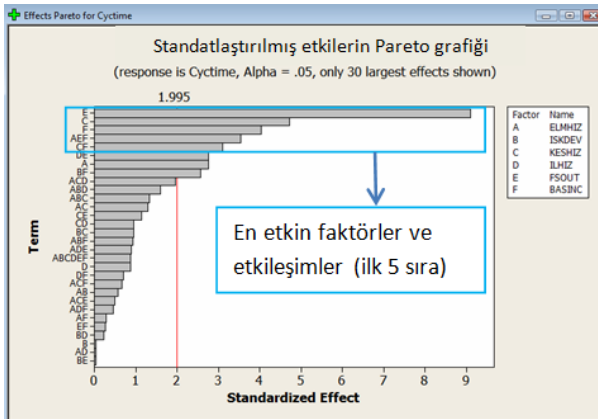
Yanıt	Optimizasyon sonucu bulunan optimum değerler	Doğrulama Deneyi Sonuçları		
		Ortalama	%95 Güven Aralığı	
			Alt değer	Üst değer
$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	0,0986	0,11934	0,0892	0,1332
$R_{vk}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,1196	0,21309	0,0945	0,2425
Çevrim Süresi (sn)	14,4432	15,898	12,995	17,125



Şekil 12. Ra için faktör etkilerine ilişkin Pareto grafiği (Pareto graph of factor effects for  $R_a$ )



Şekil 13.  $R_{vk}$  için faktör etkilerine ilişkin Pareto grafiği (Pareto graph of factor effects for  $R_{vk}$ )



Şekil 14. Çevrim Süresi için faktör etkilerine ilişkin Pareto grafiği (Pareto chart of factor effects for the Cycle Time)

Çalışma sonucunda literatürdeki tek yüzey pürüzlülüğü sonucunun en iyilendiği çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada kam makarası için  $R_a$ ,  $R_{vk}$  yüzey pürüzlülüğü değerleri ile beraber işlem çevrim süresinin

de en iyilendiği bir çalışma ortaya konmuş olup, elde edilen optimum faktör seviyeleri doğrultusunda taşlama işlemi firmada uygulanmaya başlanmıştır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Malkin, S. and Guo, C. Grinding Technology-Theory and Applications of Machining with abrasives, *Industrial Press*, New York, 2008.
- [2] Tonshoff, H. K., Karpuschewski, B. and Mandrysch, T., "Grinding Process Achievements and Their Consequences on Machine Tools Challenges and Opportunities", *Annals of the CIRP*, 47: 651-668, 1998.
- [3] Tonshoff, H. K., Friemuth, T. and Becker, J. C., "Process Monitoring in Grinding", *Annals of the CIRP*, 51: 551-571, 2002.
- [4] Demir, H. ve Güllü, A., "Silindirik Taşlamada Yüzey Pürüzlülüğü ve Taşlama Oranı İlişkisinin Araştırılması", *Z.K.Ü. Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Teknoloji*, 1-2, 151-167, 1999.
- [5] Srivastava, A.K., Yuen K.M., and Ebestavi M.A., "Surface finish in Robotic Disk Grinding", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 32: 69-297, 1992.
- [6] Gondi, P., Mattogno, G., Sili, A. and Foderaro, G., "Structural Characteristics at Surface And Barkhausen Noise in AISI 4340 Steel After Grinding", *Nondestructive Testing and Evaluation*, 10: 255-267, 1993.
- [7] Warkentin, A., Mohamed, A-M., Bauer, O. R. "Application of Shallow Circumferential Grooved Wheels to Creep-Feed Grinding", *Journal of Materials Processing Technology*, 213(5): 700-706, 2013.
- [8] Ohmori H., Katahira K., Komotori J. and Mizutani M., "Functionalization of Stainless Steel Surface Through Mirror-Quality Finish Grinding", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 57: 545-549, 2008.
- [9] Miller, M.H. and Dow, T.A., "Influence of The Grinding Wheel in The Ductile Grinding of Brittle Material: Development and Verification of Kinematic Based Model", *ASME Journal of Manufacturing Science And Engineering*, 121: 638-646, 1999.
- [10] Gavas M., Karacan İ. and Kaya E., "A Novel Method to Improve Surface Quality in Cylindrical Grinding", *Experimental Techniques*, 35: 26-32, 2011.
- [11] Susana K., Lia-Yuen and Yuan- Shin., "Turn-Mill Toll Path Planning and Manufacturing Cost Analysis for Complex Parts Machining, <http://fie.engrng.pitt.edu/ie2002/proceedings/ierc/papers/2289>, 2002.
- [12] Choi H.Z., Lee S.W., and Jeony H.D., "A Comprasion of The Cooling Effects of Compressed Cold Air and Coolant for Cylindrical Grinding With a CBN Wheel", *Journal of Materials Processing Technology*, 111: 265-268, 2001.
- [13] Hassui A., Diniz A.E., "Correlating Surface Roughness and Vibration on Plunge Cylindrical Grinding of Steel", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43: 855-862, 2003.

- [14] Suzuki, K., Uematsu, T. and Nakagawa, T., “Highly Efficient Finishing of Ceramics by Helical Scan Grinding”, Proceedings of the International Conference on Machining of Advanced Materials, *National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg*, MD, 17, 1993.
- [15] Demir, H., Güllü, A., “Taş Dokusunun Yüzey Pürüzlülüğü ve Taşlama Kuvvetlerine Etkilerinin İncelenmesi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 23(1): 77-83, 2008.
- [16] Agarwal S. and Rao P.V., “A New Surface Roughness Prediction Model for Ceramic Grinding”, *Journal of Engineering Manufacture*, 219: 811-821, 2005.
- [17] Domala K., Salisbury E., Moon, K.S., Sutherland J.W., “A Three-Dimensional Geometric Model for the Surface Texture Generated by a Single Pass of the Wheel in a Surface Grinding Process”, *Manufacturing Science and Engineering*, 3: 363-375, 1995.
- [18] Sharp, K.W., Miller, M.H. and Scattergood, R.O., “Analysis of the Grain Depth-of-Cut in Plunge Grinding”, *Precision Engineering*, 24, 220-230, 2000.
- [19] Nguyen T., Zhang L.C., Sun D., “Heat Transfer in Grinding-Hardening of a Cylindrical Component”, *Advanced Materials Research*, 325: 35-41, 2011.
- [20] Savas V., Ozay Ç., “Analysis of The Surface Roughness of Tangential Turn-Milling for Machining with End Milling Cutter”, *Journal of Materials Processing Technology*, 186: 279–283, 2007.
- [21] Kwak, J.B., Sim, S.B., Jeong, Y.D., “An Analysis of Grinding Power and Surface Roughness in External Cylindrical Grinding of Hardened SCM440 Steel Using The Response Surface Method”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46: 304–312, 2006.
- [22] Shaji, S., Radhakrishnan, V. “Analysis of Process Parameters in Surface Grinding with BLG Graphite as Lubricant Based on the Taguchi Method”, *Journal of Materials Processing Technology*, 141: 51–59, 2000.
- [23] Dhavlikara, M.N., Kulkarni, M.S., Mariappan, V. “Combined Taguchi and Dual Response Method for Optimization of a Centerless Grinding Operation”, *Journal of Materials Processing Technology*, 132: 90–94, 2003.
- [24] Krajnik, P., Kopac, J., Sluga, A. “Design of Grinding Factors Based on Response Surface Methodology”, *Journal of Materials Processing Technology*, 162–163: 629–636, 2005.
- [25] Agarwal, S. “Optimizing Machining Parameters to Combine High Productivity with High Surface Integrity in Grinding Silicon Carbide Ceramics”, *Ceramics International*, 42: 6244–6262, 2016.
- [26] Rudrapati, R., Pal, P.K., Bandyopadhyay, A. “Modeling and Optimization of Machining Parameters in Cylindrical Grinding Process”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 82: 2167–2182, 2016.
- [27] Mızrak H.V., “Makara Dış Çap Taşlamada Gerekli Yüzey Pürüzlülük Değerinin Elde Edilmesi İçin Deneysel Tasarım Yöntemi ile Optimum Taşlama Parametrelerinin Belirlenmesi”, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, 2016.
- [28] Gadelmawla, E.S., Koura, M.M., Maksoud, T.M.A., Elewa, I.M., Soliman, H.H. “Roughness parameters”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 123: 133-145, 2002.



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

# Taban külü ikame edilmiş kompoze çimentolarda süperakışkanlaştırıcı etkisinin araştırılması

## *Investigation of superplasticiser effect on blended cements replaced by bottom ash*

Yazar(lar) (Author(s)): İlker TEKİN<sup>1</sup>, Duygu TEKİN<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-7400-4790

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-0533-2699

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Tekin İ. ve Tekin D., “Taban külü ikame edilmiş kompoze çimentolarda süperakışkanlaştırıcı etkisinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 39-46, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.389581

# Taban Külü İkame Edilmiş Kompoze Çimentolarda Süperakışkanlaştırıcı Etkisinin Araştırılması

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**İlker TEKİN<sup>1\*</sup>, Duygu TEKİN<sup>2</sup>**

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

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

(Geliş/Received : 28.03.2017 ; Kabul/Accepted : 09.04.2017)

## ÖZ

Çalışmada SA'ların kompoze çimentolara etkisi ve mineral katkıların inceliğinin kimyasal katkı ile uyumu konusu amaçlanmıştır. Bu kapsamda üretilen çimento hamurları üzerinde standart kıvam, priz süreleri ve hacim genleşme deneyleri, çimento harçları üzerinde yayılma ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda Yatağan Termik Santralinden temin edilmiş 2 mm boyutlu taban külü 120 mikron ve 60 mikron olmak üzere iki farklı incelikte öğütüldükten sonra CEM I (PÇ 42,5R) tipi çimentoya ağırlıkça %0, 10%, 20% ve 30% oranlarında ikame edilmiştir. Deneyler sırasında A ve B firmalarına ait polinaftalin sülfonat (PNS) içerikli aynı özelliklere sahip süperakışkanlaştırıcı (SA) katkıları ayrı ayrı denenmiştir. Sonuçlara göre mineral katkının inceliği basınç dayanımını artırırken priz sürelerini de hızlandırmıştır. PNS esaslı SA'lar taze hamur davranışlarında özellikle priz başlangıcında kısılma ve priz bitişinde uzama gibi etkiler gösterirken harç karışımlarda önemli derecede etki oluşturmuştur. Bir diğer sonuç PNS esaslı kimyasal katkılarda firma farkı ile çimento uyumu önemli bir parametredir ve bu parametrenin özellikle çimento hamuru üzerinde önemli etkiler oluşturduğu söylenebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Taban külü, kompoze çimento, polinaftalin sülfonat, akışkanlaştırıcı, katkı.

# Investigation of Superplasticiser Effect on Blended Cements Replaced By Bottom Ash

## ABSTRACT

In the study, the main aim was determined conformity between blended cements and superplasticizer (SP) with fineness of mineral additives. Within this scope, compressive strength test and flow table test were performed on the cement mortars and standard consistency, setting times and soundness tests were performed on cement pastes which prepared with blended cements. In the experimental studies, bottom ash from Yatagan thermal power plant which was used after grinded size from 2 mm to 120 µm and 60 µm sizes was replaced with CEM I 42.5R type cement by weight 0%, 10%, 20% and 30%. Moreover superplasticizer additives which contained poly naphthalene sulfonate (PNS) from different companies were tried in blended cements. According to the results, fineness of mineral additives increased the compressive strength of the mortars and accelerated setting times. PNS based SP's affects fresh paste behaviors such as reducing initial setting times and retarding finish setting times. Another result is that company differences in PNS based chemical additives is significant parameter with cement conformity and this parameter makes up significant effects on fresh cement paste.

**Keywords:** Bottom ash, blended cement, polynaphthalene sulfonate, superplasticizer, admixture

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mineral katkıların çimentoda üretiminde klinker yerine kullanılması sonucunda enerji sarfiyatlarında ve zararlı gaz oluşumunda önemli azalmalar meydana gelmektedir [1]. Doğal ve yapay mineral katkıları çimentonun dayanım ve dayanıklılığını da olumlu yönde etkilemektedir. En yaygın kullanılan mineral katkıları uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, taban külü (TK), tras, pirinç kapçığı külü, mermer tozudur. Mineral katkıların en önemli etkileri çimentonun özgül ağırlıklarını ve hidrasyon ısılarını azaltmak, priz sürelerini uzatmak, erken dayanımları azaltırken geç dayanımları artırmak olarak söylenebilir [2].

Mineral katkıları puzolan ve dolgu katkısı olarak sınıflandırılmaktadır. Bu katkıların çimentoda kullanılabilmesi için en az çimento inceliğinde olmalıdır. Çimentodaki bileşenlerin incelikleri ile mekanik mukavemet ve taze hamur özellikleri arasında ilişki olduğu bilinmektedir. Mineral katkıların öğütme miktarındaki artış özgül yüzey alanının artmasına sebep olur, böylece katkının kullanıldığı çimentonun hem fiziksel hem de mekanik mukavemetlerini etkiler [3,4]. Çimentoda 3-30 µm boyutlu taneler mekanik mukavemetleri önemli derecede etkilerken, 60 µm'den büyük tanelerin sadece "doldurma etkisi" olduğu belirtilmiştir [3]. Taban külü (TK) termik santrallerde atık olarak elde edilen, ağır ve büyük taneli yapıya sahip olduğu için tabana çökelen malzemelerin bütünüdür. Termik santrallerde taş kömürü yakıldığında yaklaşık

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

%15, linyit kömürü yakıldığında yaklaşık %40 kül olarak çökeltmektedir [4,5].

Yapılan araştırmalarda termik santral atıkları ile ilgili sayısız çalışma bulunmaktadır. Ancak bu çalışmaların büyük bir çoğunluğu uçucu külü konu almaktadır. Bir kısım çalışma ise TK'yı hedef almıştır. Hopkins ve diğerleri [6] 45µm'nin altında TK'nın çimentonun özelliklerini arttırdığını belirtmiştir. Cherief ve diğerleri [7] %25 TK ikameli harç çubukları üzerinde dayanım etki indeksinin 28 günde 0,88, 90 günde de 0,97'e ulaştığını belirlemiştir. Uygun öğütme işlemiyle puzolanik aktivitenin geliştiği, 28. günde TK'nın dayanım indeksinin %27 arttığı belirtilmiştir. Jaturapitakkul ve Cheerarat [8] TK ikame oranı arttıkça su ihtiyacının da arttığı, öğütülmüş taban küllü harcın öğütülmemiş taban küllü olandan ve çimento harcından daha az su ihtiyacına sahip olduğu belirtmiştir. %30'a kadar çimento yerine ikame edilen öğütülmüş TK ile hazırlanmış harç numunelerinin 28 günden itibaren basınç dayanımlarının PÇ dayanımından daha yüksek çıktığı görülmüştür. Kaya [9] TK katkılı çimentolarda daha düşük hacim genleşme değeri gösterdiği, priz sürelerinin uzadığı, erken basınç dayanımının daha düşük olduğu, kütlece %10-20 ikameli çimentoların 28 günlük dayanım sonucunun, kontrol numunesine yakın sonuçlar

SA ile üretilen çimentoların taze hamur ve sertleşmiş harç davranışlarını araştırmak ve çimento-katkı uyumunun olup olmadığını belirlemektir.

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

Çalışmada EN 197-1'e [17] uygun Aşkale Çimento Fabrikasından temin edilmiş CEM I 42,5 (PÇ 42,5 R) tipi çimento, EN 196-1'e [18] uygun standart CEN kumu, mineral katkı olarak Yatağan Termik Santral taban külü (TK) kullanılmıştır. Ayrıca hamur ve harç numunelerin üretiminde kimyasal katkı olarak 2 farklı firmanın (Amerika Menşei: A ve Almanya Menşei:B) polinaftalin sülfonat esaslı SA katkıları kullanılmıştır. A katkısının katı madde içeriği %39,1, pH değeri 9,5, yoğunluğu 1,2 g/cm<sup>3</sup>'tür. B katkısının katı madde içeriği %39,3, pH değeri 7,5, yoğunluğu 1,2 g/cm<sup>3</sup>'tür. Deneylerde kullanılan çimento ve mineral katkıların kimyasal özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1'de verilen TKi terimi ile 63 mikron incelikte öğütülmüş olan TK, TKk terimi ile 125 mikron incelikte olan TK tanımlanmıştır. TK'nın mikroskobik ve mineralojik özellikleri Şekil 1'de verilmiştir. SA'ların FTIR spektroskopileri Şekil 2'de gösterilmiştir.

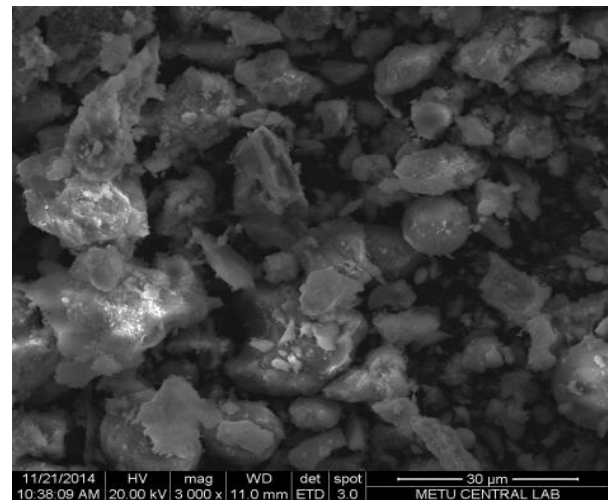
**Çizelge 1.** Kullanılan malzemelerin teknik özellikleri (Technical specifications of materials)

Kimyasal Özellikler			Fiziksel Özellikler		
Oksitler (%)	CEM I	TK	CEM I	TKi	TKk
SiO <sub>2</sub>	18,21	48,95	İncelik (45µm üstü %)	7,17	78,50 45,32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,54	16,97	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	3,12	2,30 2,22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,1	5,82	Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3616	2362 1665
CaO	63,5	15,84	Priz Başlangıcı (dk)	146	-
MgO	2,57	2,04	Priz Bitişi (dk)	189	-
SO <sub>3</sub>	2,82	1,69	Hacim Genleşmesi (mm)	1	-
Na <sub>2</sub> O	0,22	5,78	Standart kıvam (%)	29,5	-
K <sub>2</sub> O	0,65	0,52	Basınç Dayanımı 2 gün (MPa)	27,72	-
LOI	3,87	1,59	Basınç Dayanımı 28 gün (MPa)	58,81	-

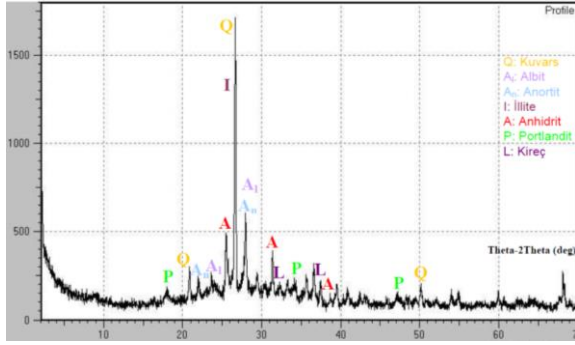
verdiği ve TK katkılı çimentoların öğütülebilirliğinin PÇ'den daha kolay olduğu görülmüştür.

Kimyasal katkıların en yaygın kullanılanları akışkanlaştırıcılardır. Bunlar çimentolu sistemlerin öncelikle fiziksel özelliklerini bazen de mekanik özellikleri etkilerler [10-12]. Akışkanlaştırıcı kimyasal maddelerin farklı çimentolarla davranışı üzerine sayısız çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda çimento-akışkanlaştırıcı uyumunun beton bileşenlerinin özellikle kimyasal ve fiziksel özelliklerindeki değişime bağlı olduğu belirlenmiştir [13-16]. Ancak katkı-çimento uyumu konusu halen bir bilinmeyen olarak görülmektedir.

Bu çalışmada iki farklı incelikte Yatağan Termik Santral taban külü çimentoya farklı oranlarda ikame edilmiş ve ardından üretilen kompoze çimentolar üzerinde farklı firmalara ait polinaftalin sülfonat esaslı SA'nın etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda çalışmanın amacı farklı firmalar tarafından üretilen polinaftalin sülfonat esaslı

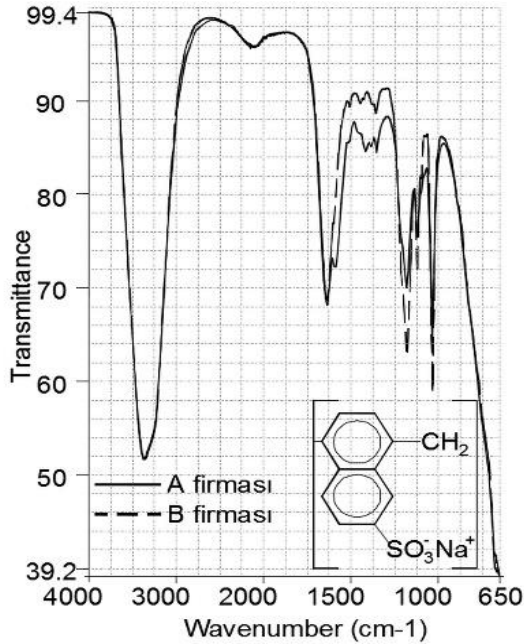


**Şekil 1a.** Taban külünün mikroskobik yapısı (Microscopical structure of TK)



Şekil 1b. Taban külünün mineralojik yapısı (Mineralogic structure of TK)

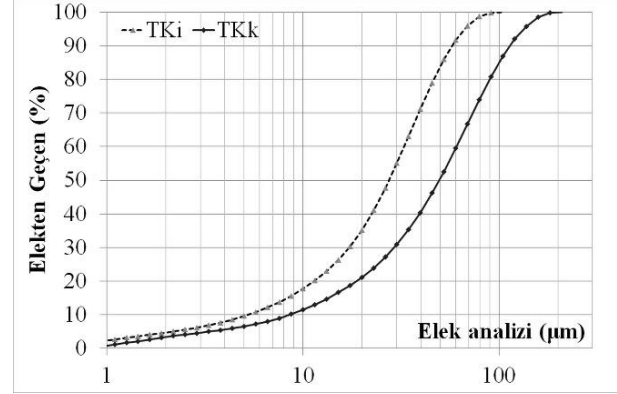
Çizelge 1'e göre TK'da  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3=71,74\%$  tür. TK'nin mineralojik yapısı Şekil 1a'da mikroskopik yapısı ve Şekil 1b'de mineralojik yapısı gösterilmiştir. Şekil 1a'da yuvarlak yapılarla monoklinik ve rombohedral kristal yapılar görülmektedir. Bu yapılar Şekil 1b'de açıklanabilir hale gelmiştir. Buna göre göre TK'de kils, amorf ve kireç içerikli yapılar vardır. Şekil 2'de iki firmaya ait SA'nın fonksiyonel ve yapısal grupları Fourier Transform Infrared Spectrum (FTIR) ile belirlenmiştir. SA örnekleri FTIR analizinde geniş bir aralık göstermiştir. Bu aralıkta  $3300\text{ cm}^{-1}$  spektrumu genellikle keskin ve sağlam C-H bağlarını,  $1500-1600\text{ cm}^{-1}$  halka içinde zayıf ve orta C=C bağlarını,  $1350-1450\text{ cm}^{-1}$  yoğun bir pik olmasa da güçlü sülfat S=O bağlarını,  $1050-1200\text{ cm}^{-1}$  güçlü C=S tiokarbonil bağlarını,  $700-100\text{ cm}^{-1}$  ise güçlü S-O-R bağlarını göstermektedir [19]. Analize göre B firmasına ait SA'nın S=O ve C=S bağ yoğunluğu A firmasına ait SA'ya göre daha azdır.



Şekil 2. SA'ların FTIR analizi (FTIR analysis of SP)

Çalışmada TK öncelikle 24 saat süreyle  $105\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta etüvde bekletilmiş ve diskli öğütücüde iki

farklı incelikte öğütülmüştür. İnce TK'nın (TKi) öğütme sonuçları:  $D_{90}: 60\text{ }\mu\text{m}$ ,  $D_{50}: 27,5\text{ }\mu\text{m}$  ve  $D_{10}: 5,75\text{ }\mu\text{m}$  iken kaba TK'nın (TKk) öğütme sonuçları:  $D_{90}: 120\text{ }\mu\text{m}$ ,  $D_{50}: 50\text{ }\mu\text{m}$  ve  $D_{10}: 8,6\text{ }\mu\text{m}$ 'dir. Öğütme sonrasında toz haldeki malzemeler hava sızdırmayan kaplarda saklanmıştır. Öğütülmüş malzemelerin fiziksel özellikleri Çizelge 1'de, tane elek analizleri Şekil 3'te verilmiştir. Çizelge 1'e göre her iki öğütülmüş TK'nın özgül yüzey değeri CEM I'e göre daha küçüktür.



Şekil 3. TK'nın tane incelik analizi (Fineness analysis of TK)

DeneySEL çalışmalarda TKi ve TKk'nın her biri %0, %10, %20 ve %30 oranlarında CEM I tipi çimento ile ikame edilerek toplam 6 tip kompoze çimento elde edilmiştir. Çizelge 2'de TKk ikame edilen çimentolar PKC, TKi ikame edilen çimentolar PkC olarak adlandırılmış ve yoğunlukları ile özgül yüzey değerleri verilmiştir. Çizelge 2'ye göre yoğunluğu en düşük olan çimento PKC6, inceliği en yüksek olan çimento PkC3'tür. Buna göre TK ikameli tüm çimentolar CEM I'e göre daha ince ve daha düşük yoğunluğa sahiptir. Üretilen çimentolarla öncelikle TS EN 196-3'e [20] göre çimento hamur numuneleri ve sonrasında TS EN 196-1'e göre standart harç numuneleri hazırlanmıştır. Çimento hamur ve harçlarının hazırlığında karışım sularına üretici firmaların katalog önerilerinde belirtilen en yüksek oran olan 0,02 oranında A ve B firmasına ait SA'lar ayrı ayrı eklenmiştir. Ardından taze haldeki çimento hamurları üzerinde TS EN 196-3'e göre kıvam tayini, priz süreleri, hacim genleşme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Taze harç numuneler üzerinde öncelikle ASTM C230'a göre [21] yayılma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yayılma deneyi sonrasında harç malzeme TS EN 196-1'e göre  $40\times 40\times 160\text{ mm}$  boyutlu kalıplara yerleştirilmiş ve düşey eksenli vibrasyon tablasında 2 kademe toplam 2 dakika süre ile sıkıştırılmıştır. Harç numuneler kalıplarda 24 saat süreyle  $22\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $45\pm 5\%$  bağıl neme sahip laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Sertleşen harç numuneler  $22\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığa sahip bir kür tankında kirece doymuş su içine konulmuş ve 2, 7 ve 28 gün yaşlarında basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir.



**Çizelge 2.** Kompoze çimentoların fiziksel özellikleri (Physical properties of blended cements)

İncelik (Elek açıklıkları)	Çimento Tipi	Ağırlıkça TK oranı (%)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Özgül Yüze (Blaine cm <sup>2</sup> /g)
Referans	R0	0	3,12	3616
63 µm mineral katkı	PkC1	10	3,04	3491
	PkC2	20	2,96	3365
	PkC3	30	2,87	3240
125 µm mineral katkı	PKC1	10	3,03	3421
	PKC2	20	2,94	3226
	PKC3	30	2,85	3031

**Çizelge 3.** TK ikameli kompoze çimentoların taze haldeki deney sonuçları (Results of the fresh cements pastes replaced by TK)

No	TK ikame (%)	SA Firma Kodu	Standart kıvam (%)	Priz başlangıcı (dk)	Priz bitişi (dk)	Hacim genişleme (mm)
R0	0	-	30,5	170	310	1,48
R1	0	A	23,6	45	385	0,44
R2	0	B	22,6	150	315	0,26
PKC1	10	A	23,7	50	380	1,42
PKC2	20	A	23,9	115	410	1,19
PKC3	30	A	24,2	140	460	0,99
PKC1	10	B	22,7	215	375	1,28
PKC2	20	B	23,3	260	400	1,12
PKC3	30	B	23,7	285	420	0,24
PkC1	10	A	24,5	45	350	1,45
PkC2	20	A	25,2	65	400	1,25
PkC3	30	A	26,3	100	450	1,01
PkC1	10	B	23,9	200	330	1,39
PkC2	20	B	24,5	240	350	0,89
PkC3	30	B	25,8	265	415	0,53

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

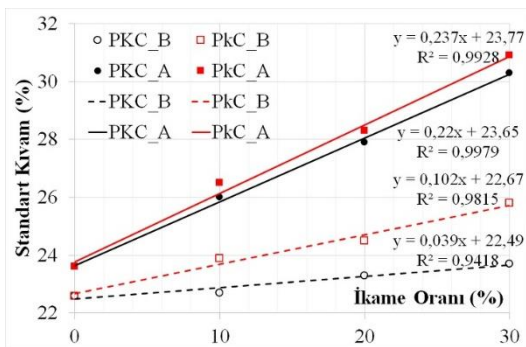
TK ikameli çimentoların taze hamur deney sonuçları Çizelge 3'te ve sertleşmiş harç deney sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelge 3 ve 4'te R0 kimyasal ve mineral katkısız referans numuneyi, R1: A firmasına ait SA kimyasal katkılı mineral katkısız referans harç numunelerini ve R2: B firmasına ait SA kimyasal katkılı mineral katkısız referans harç numunelerini göstermektedir. Bundan dolayı R0, R1 ve R2 ikame oranları %0 olarak ifade edilmiştir. Çalışmada 1) çimento tipi – SP katkı, 2) çimento – mineral katkı inceliği ve 3) mineral katkı inceliği – SP katkı aralarındaki ilişki ve etkileşimler incelenmiştir.

Çizelge 3'e göre SA kullanımı su ihtiyacını önemli derecede azaltmıştır. R0'a göre B firmasına ait SA su ihtiyacını %8,3 azaltırken, A firmasına ait SA %6,9 oranında azaltmıştır. B firmasına ait katkının su azaltmadaki etkisi A firmasına ait katkıya göre daha fazla olmuştur. Bunun sebebi B firmasına ait katkının FTIR analizinde S=O ve C=S bağ yoğunluğu A firmasına ait katkıya göre daha az olması ya da B firmasına ait katkının katı madde oranının %0,2 daha fazla olması sebebiyledir [22]. B firmasına ait katkı, kompoze çimentolarda da benzer davranış göstermiştir. Buna göre PKC kompoze çimentolarında B firmasına ait katkı ile üretilen

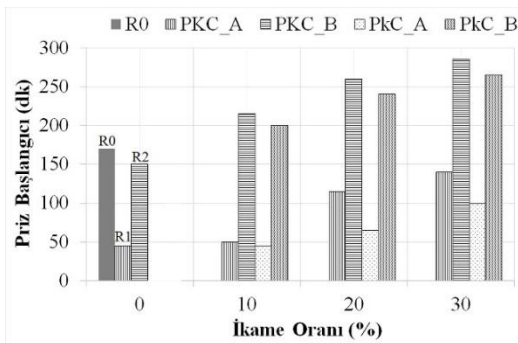
hamurlarda A firmasına ait katkı ile üretilen hamurlara göre %10, %20 ve %30 ikame için sırasıyla %1, %0,6, %0,5 daha az su kullanılarak standart kıvam elde edilmiştir. PkC kompoze çimentolarında B firmasına ait katkı ile üretilmiş hamurlarda A firmasına ait katkı ile üretilen hamurlara göre %10, %20 ve %30 ikame için sırasıyla %0,6, %0,7, %0,5 daha az suyla standart kıvam elde edilmiştir. Böylece çimentoda TK mineral katkı oranı arttıkça SA katkıların çimentoyla etkileşiminin azaldığı söylenebilir [3]. Bunun sebebi kompoze çimentolardaki C<sub>3</sub>S ve C<sub>3</sub>A miktarındaki azalma ile de açıklanabilir [23].

A firmasına ait SA özellikle referans çimento hamurunda (R1) priz sürelerini önemli derecede etkilemiştir. Üretilen tüm çimentolarda ve referans çimentoda priz başlangıcı hızlanırken priz bitişi gecikmiştir. Bu davranış A firmasına ait SA kimyasal katkısının hidratasyon başlangıcında C<sub>3</sub>A ve C<sub>3</sub>S ile etkileşiminin, B firmasına ait SA'ya göre daha az olduğunun bir göstergesi olabilir [22]. Bu durum su azaltma davranışında da açıkça görülmektedir. B firmasına ait SA, A firmasına ait SA kimyasal katkısına göre daha fazla su azaltmıştır. Böylece mineral katkının inceliği ve ikame oranı arttıkça katkıların etki mekanizmaları arasındaki fark azalarak her ikisinin de aynı oranda çalıştığı görülmüştür. Çalışmanın bir diğer bulgusu her iki incelikteki TK ikameli çimentolarda, mineral katkı oranı arttıkça su

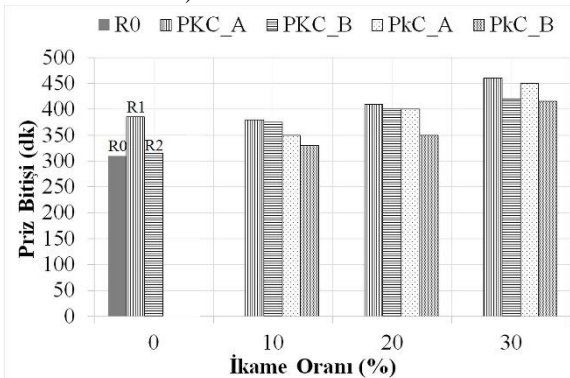
ihtiyacı artmıştır. Malzemenin su ihtiyacındaki bu artışın sebebi, TK'nın su bağlama ve absorpsiyon kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Bu artış katkı oranına bağlı olarak Şekil 4'te görüldüğü gibi doğrusal bir ilişki oluşturmuştur. Şekil 4 - 7'de verilen kısaltmaların açıklamaları şöyledir: PKC\_A: A firmasına ait SA kimyasal katkısı ile üretilen 125 mikron inceliğe sahip mineral katkılı Portland kompoze çimento hamur veya harcı, PKC\_B: B firmasına ait SA kimyasal katkısı ile üretilen 125 mikron inceliğe sahip mineral katkılı Portland kompoze çimento hamur veya harcı, PkC\_A: A firmasına ait SA kimyasal katkısı ile üretilen 63 mikron inceliğe sahip mineral katkılı Portland kompoze çimento hamur veya harcı, PkC\_B: B firmasına ait SA kimyasal katkısı ile üretilen 63 mikron inceliğe sahip mineral katkılı Portland kompoze çimento hamur veya harcı.



Şekil 4. Çimentoların su ihtiyacına ilişkin korelasyon diyagramı (Correlation between w/c and TK replacement ratio)

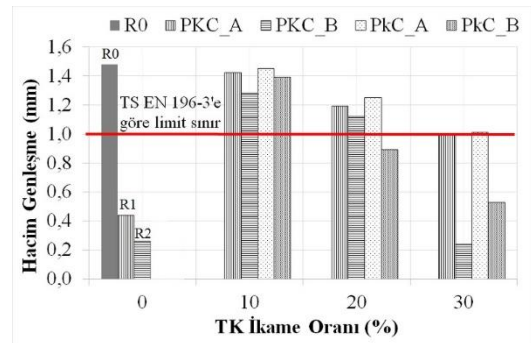


Şekil 5a. Çimentoların priz başlangıcı (Initial setting time of cements)



Şekil 5b. Çimentoların priz bitişi (Final setting time of cements)

Şekil 5'te görüldüğü gibi A firmasına ait kimyasal katkı, katkısız çimentoda priz başlangıcı süresini 125 dk kadar önemli derecede azaltırken, B firmasına ait katkı başlangıç priz süresini aynı çimentoda 20 dk azaltmıştır. Priz bitiş süreleri katkısız çimentolarda A firmasına ait kimyasal katkı ile (R1) 75 dk artarken, B firmasına ait kimyasal katkı ile (R2) 5 dk artmıştır. PNS'lerdeki sülfatlar C<sub>3</sub>S ve C<sub>3</sub>A'nın hidratasyonunu geciktirir ve böylece etrenjit monosülfatlara dönüşümü de gecikmiş olur [22]. Bundan dolayı PNS esaslı kimyasal katkıların priz sürelerini etkilediği ve hatta priz bitiş sürelerini uzattığı bilinmektedir [13]. Bu çalışmada aynı kimyasal bileşime sahip ayrı iki firmanın kimyasal katkıları referans ve kompoze çimentoların priz sürelerini farklı derecede etkilemiştir. Böylece çimento- kimyasal katkı uyumu priz süreleri konusunda önemli bir parametre olduğu görülmüştür. Çimentoya mineral katkı ikame edildiğinde, mineral katkı oranı ve inceliğine bakılmaksızın priz süreleri uzamıştır. A firmasına ait kimyasal katkı ile üretilen hamurlarda mineral katkı inceliği arttıkça priz başlangıcı hızlanmış, mineral katkı oranı arttıkça priz başlangıcı süresi uzamıştır. PKC çimentolarda %0, 10, 20 ve %30 TK ikame oranları için R0'a göre A firmasının kimyasal katkısı ile prize başlangıcı sırasıyla 125, 120, 55 ve 30 dk daha kısalmış, priz bitiş süresi 75, 70, 100, 150 dk uzamıştır. PkC çimentolarda %0, 10, 20 ve %30 TK ikame oranları için R0'a göre A firmasının kimyasal katkısı ile prize başlangıcı sırasıyla 125, 125, 105 ve 70 dk daha kısalmış, sırasıyla priz bitiş süresi 75, 40, 90, 140 dk uzamıştır. Böylece hem mineral katkı inceliği hem de farklı firmalara ait SA kimyasal katkıların priz süreleri üzerindeki etkisinin önemli olduğu söylenebilir. B firmasına ait olan kimyasal katkı priz başlangıç ve bitiş süreleri bakımından işlenebilirlik düşünüldüğünde daha uygun olduğu söylenebilir. Mineral katkı inceliği priz bitiş sürelerini etkilerken, kimyasal katkının firma farkı priz bitiş sürelerine önemli etkiler oluşturmamıştır.



Şekil 6. Çimentoların hacim genleşmeleri (Soundness of the cements)

**Çizelge 4.** Kompoze çimento harçlarının deney sonuçları (Results of the blended cement mortars)

No	SA Tipi	BT ikame (%)	Yayılma (cm)	Basınç Dayanımı (MPa)		
				2 gün	7 gün	28 gün
R0	Katkısız	0	22,0	26,8	39,4	50,6
R1	A	0	24,5	22,1	41,5	53,7
R2	B	0	25,2	23,8	44,5	52,3
PKC1	A	10	22,2	21,9	37,8	46,2
PKC2	A	20	21,7	19,5	36,1	41,9
PKC3	A	30	21,5	17,0	28,3	38,1
PKC1	B	10	23,8	23,1	36,9	43,2
PKC2	B	20	23,0	19,9	30,7	41,7
PKC3	B	30	22,0	14,1	24,1	34,3
PkC1	A	10	22,5	22,6	40,8	49,9
PkC2	A	20	22,4	20,0	39,2	48,0
PkC3	A	30	22,3	15,1	31,9	40,9
PkC1	B	10	24,0	24,6	38,1	45,9
PkC2	B	20	23,5	20,3	36,9	43,4
PkC3	B	30	23,0	16,8	26,2	36,5

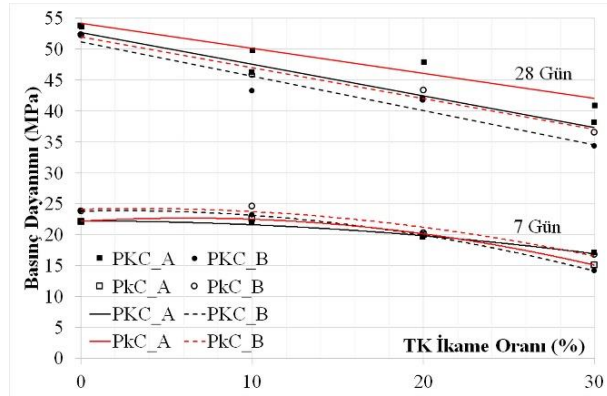
Şekil 6'da SA kimyasallar etkisinde kompozit çimentoların hacim genleşme sonuçları gösterilmiştir. Hacim genleşmeye firma farkı gözetmeksizin kimyasal katkıların etkisi olumlu olmuştur. Burada hidrasyon kinetiğinin yavaşlaması sebebiyle hacim genleşmenin de azaldığı söylenebilir [15]. R0 hem kimyasal hem de mineral katkısız referans numunede 1,48 mm genleşme gözlenirken, SA katkılı hamurlarda genleşme R1 için yaklaşık %70 ve R2 için %82 oranında azalmıştır. Böylece B firmasına ait SA kimyasal katkısının hacim genleşmeyi en fazla oranda azalttığı belirlenmiştir. S=O bağ sayısındaki farklılık bunun bir sebebidir [22]. Ancak PNS katkılı kompoze çimento hamurlarında hacim genleşmeleri referanslara göre yüksek çıkmıştır. İkame oranı arttıkça hacim genleşme azalma eğrisi oluştururken mineral katkının inceliği ile hacim genleşmenin çok bağımlı olmadığı gözlemlenmiştir. Mineral katkıdaki inceliğin artması SO<sub>3</sub>, CaO ve MgO yapılarının artmasına sebep olmadığı için genleşmede önemli bir değişim oluşturmamıştır.

Çizelge 4'te basınç dayanımı ve yayılma deneyinin toplu sonuçları, Şekil 7'de ise basınç dayanımı sonuçlarının korelasyon eğrileri verilmiştir. Buna göre mineral katkısız çimentoda her iki kimyasal katkı erken dayanımları olumsuz etkilerken, sonraki yaşlarda basınç dayanımına etkileri olumlu olmuştur. A firmasına ait kimyasal katkı ile üretilen R1 numunesinin basınç dayanımı R0'a göre 2 gün yaşında %17,5 azalırken, 7 ve 28 gün yaşlarında sırasıyla %5,3 ve %6,1 artmıştır. B firmasına ait kimyasal katkı ile üretilen R2 numunesinin basınç dayanımı referans numuneye göre 2 gün yaşında %11,2 azalırken, 7 ve 28 gün yaşları için sırasıyla %12,9 ve %3,4 artmıştır. Kimyasal katkıda firma farkının etkisi CEM I'de erken dayanımı olumsuz etkilemiş ancak sonraki yaşlarda etkisi önemsiz olmuştur. Bu durum çimento hidrasyonunun ileri yaşlarında SA kimyasal katkısının firma farkı gözetmeksizin erken reaksiyonları etkileyip sonrasında katalizör gibi davrandığının bir göstergesidir. Bunun sebebi aynı zamanda priz sürelerine bağlı olan hidrasyon kinetiğinin etkilenmesidir. Priz sürelerinin uzaması erken dayanımları olumsuz etkileyen

bir sonuçtur [23]. SA kullanılan çimentolarda priz sürelerinde bir miktar gecikme olsa da C<sub>3</sub>S hidrasyon ürünlerinin 28 gün sonunda SA katkısız sistemlerle aynı miktarda olduğu belirtilmiştir. Ancak C<sub>3</sub>A ile alçı arasındaki reaksiyon ürünleri morfolojik olarak hegzagonal formdan ziyade kübik forma dönüşebilir. Bu durum erken dayanımı düşürülen bir faktör olarak bilinmektedir [22].

TK katkılı çimentolarda B firmasına ait SA kimyasal katkıyla üretilen PKC grubu harçların basınç dayanımları erken ve geç süreçlerde B firmasına ait SA kimyasal katkıyla üretilen PKC grubu harçlara göre daha düşük olmuştur. Ancak %10 ve %20 TK ikameli PKC ve PkC'li harç numunelerin basınç dayanımları kimyasal katkı etkisinde önemli oranda değişmezken, %30 TK ikamesiyle üretilen PKC ve PkC'li harç numunelerde A ve B katkılarının basınç dayanımlarına etkileri %10'dan yüksek olmuştur. Bu durum TK'nin kimyasal içeriğinin kimyasal katkıların içeriğiyle bir uyuma sahip olduğunu göstermektedir.

Kimyasal katkının etkisinde CEM I tip çimentoya TK ikamesi basınç dayanımlarını önemli derecede etkilemiştir. PKC\_A'nın erken basınç dayanımları %10, 20 ve %30 ikame oranları için R0'a göre sırasıyla yaklaşık %18, %27 ve %37, nihai basınç dayanımlarında sırasıyla yaklaşık %9, %17 ve %25 daha düşüktür. Basınç dayanımlarındaki bu azalma oranları B firmasına ait kimyasal katkı ile üretilen harçlarda ve ince mineral katkıyla üretilmiş çimentolar için benzerlik göstermektedir. Ancak mineral katkının inceliği arttıkça basınç dayanımlarındaki azalmanın oranı da azalmaktadır. Dahası TK ve uçucu kül ikamesi katkısız çimentolara göre basınç dayanımlarını 28 günlük süreçte olumsuz etkilemektedir [13, 23]. TK ikame oranı arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Çimentodaki TK'nin inceliği arttıkça erken basınç dayanımlarında %10'dan daha düşük artışlar oluşmuş, ancak nihai basınç dayanımındaki artışın %10'dan daha fazla oranlarda olduğu görülmüştür. Özellikle ikame oranı arttıkça bu oran daha belirgin hale gelmektedir.



Şekil 7. Çimentoların basınç dayanımları ile zaman arasındaki korelasyon (Correlation between cements and age)

A firmasına ait SA kimyasal katkıli PKC'li harçların nihai basınç dayanımları, yine A firmasına ait SA kimyasal katkıli PKC'li harçların nihai basınç dayanımına göre, ikame oranları %10, 20 ve %30 için, sırasıyla %7,4, %12,7 ve %6,8 daha düşüktür. Katkının firma farkına bakılmaksızın TK inceliği arttıkça basınç dayanımları her ikame oranında artmıştır. Bu durumda A firmasına ait kimyasal katkı ile üretilen kompoze çimento harçlarının basınç dayanımları B firmasına ait kimyasal katkı ile üretilenlere göre daha yüksek olduğu için çimento – kimyasal katkı (firma bakımından) arasında uyum açıkça görülmektedir. Ayrıca PNS içerikli SA katkı ile üretilmiş harçlarda 45 µ incelikli TK ikamesinin %20'ye kadar kullanımının nihai basınç dayanımının 42,5 MPa'dan daha yüksek elde edildiği için diğerlerine göre uygun olduğu düşünülmüştür.

Harçların yayılma davranışlarında R0 referans numunesine göre, çarpma sayısına bağlı olarak, A firmasına ait SA katkısının yayılmada (işlenebilirlikte) %11,4 daha etkili olduğu, B firmasına ait SA katkısının yayılmada %14,5 daha etkili olduğu belirlenmiştir. Böylece mineral katkısız çimentolarda işlenebilirlik aynı tip SA katkısının firma farkında %3 farkla etkili olduğu söylenebilir. Bu durum işlenebilirlik için çimento-kimyasal katkı uyumunun olduğunu göstermiştir. Kompoze çimentolarda mineral katkının inceliğinin işlenebilirliğe etkisinin önemsiz derecede olduğu söylenebilir. Ancak kimyasal katkıdaki firma farkı inceliğe bakılmaksızın işlenebilirliği etkilemiştir. İkame oranı arttıkça işlenebilirlik artmıştır.

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. PNS esaslı farklı firmalara ait kimyasal katkı CEM I 42.5R ve TK ikameli kompoze çimentoların taze hamur özelliklerini ve davranışlarını önemli derecede etkilemiştir. Böylece aynı tip katkının farklı firmalarına ait PNS esaslı kimyasal akışkanlaştırıcılarla taze çimento hamuru arasında bir uyum olduğu belirlenmiştir.

2. PNS esaslı farklı firmalara ait kimyasal katkı erken dayanımları etkilememiş, ancak geç dayanımları %10'na kadar etkilemiştir.
3. PNS esaslı farklı firmalara ait kimyasal katkı yayılma davranışını önemli derecede etkilememiştir.
4. TK'nın inceliği arttıkça standart kıvam için gerekli su ihtiyacı, hacim genleşme, yayılma ve basınç dayanımları artmış, ancak priz başlangıcı ve bitiş süreleri azalmıştır.
5. TK ikame oranı arttıkça basınç dayanımları, hacim genleşme ve yayılma azalmış, ancak su ihtiyacı ve priz süreleri artmıştır..

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmada XRF analizlerinin yapılmasında ve çimento temininde göstermiş oldukları destekleyici tutumlarından dolayı Aşkale Çimento Fabrikası kalite kontrol yetkililerine teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Roskovic R, Bjegovic D, "Role of mineral additions in reducing CO<sub>2</sub> emission", *Cem. Concr. Res.*, 35: 974-978 (2005).
2. Kocak Y, "Termik Santral Atığı Uçucu Külün Portland Çimentosu Özelliklerine Etkisi". *Politeknik Dergisi*, 14 (2): 135-140 (2011).
3. Celik IB, "The effects of particle size distribution and surface area upon cement strength development", *Powder Technology*, 188: 272-276 (2008).
4. Wel, L., Naik, T.R., Golden, D.M., "Construction Materials Made with Coal Combustion By-Products", *Cement, Concrete and Aggregates*, 16 (1): 36-42 (1994).
5. Yılmaz K., Canpolat F., Arman H., "Taban külü ve doğal zeolitin puzolanik çimentoda katkı olarak kullanımı", *Beton 2004 Kongresi*, İstanbul, 10-12 (2004).
6. Hopkins, D. S., Oates, D.B. (1998) *U.S Patent No. 5,849,075*. Washington, D.C.: U.S. Patent and Trademark Office.
7. Cheriaf M., Cavalcante R.J., Pérab, J. "Pozolanic Properties of Pulverized Coal Combustion Bottom Ash", *Cem. Concr. Res.*, 29: 1387-1391 (1999).
8. Jaturapitakul, C., Cheerarot, R. "Development of bottom ash as pozzolanic material", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15: 48-53 (2003).
9. Kaya, A.İ., "A Study on Blended Bottom Ash Cements", MS Thesis, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, ODTÜ (2010).
10. Hanehara S., Yamada K. "Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology" *Cem. Concr. Res.*, 29: 1159-1165 (1998).
11. Zhang MH, Sisomphon K, Ng TS, Sun DJ. "Effect of superplasticizers on workability retention and initial setting time of cement pastes" *Construction and Building Materials*, 24: 1700-1707 (2010).
12. Şimşek O., Dur A., Yaprak H., "Silis Dumanı ve Süperakışkanlaştırıcı Katkıli Harçların Özellikleri" *Politeknik Dergisi*, 7(2):169-178 (2004).

13. Erdođdu S. "Compatibility of superplasticizers with cements different in composition". *Cem. Concr. Res*, 30: 767- 773 (2000).
14. Simard MA, Nkinamubanzi PC, Jolicoeur C. "Calorimetry, rheology and compressive strength of superplasticized cement pastes". *Cem. Concr. Res*, 23: 939-950 (1993).
15. Jolicoeur C, Simard MA. "Chemical admixture-cement interactions: Phenomenology and physico-chemical concepts". *Cement and Concrete Composites* 20: 87-101 (1998).
16. Papo A, Piani L. "Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes". *Cem. Concr. Res.*, 34: 2097-210 (2004).
17. TS EN 197-1, "**Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri**", Türk Standartları Enstitüsü Kurumu, Türkiye, p.29 (2012).
18. TS EN 196-1, "**Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini**", Türk Standartları Enstitüsü Kurumu, Türkiye, p.31 (2009).
19. Reusch W., *Infrared Spectroscopy lecture notes*, Michigan State University, Department Of Chemistry, USA, (2013).
20. TS EN 196-3, "**Çimento deney metotları- Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genleşme tayini**", Türk Standartları Enstitüsü Kurumu, Türkiye, p.16 (2014).
21. ASTM C230, "**Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement**", American Society of Testing Materials, USA, p.6 (2012)
22. Rixom R, Mailvaganam N. *Chemical Admixtures for Concrete*. 3rd ed. London UK, E. & F.N. Spon Ltd, (1999).
23. Mehta PK, Monteiro PJM. *Concrete Microstructure Properties and Materials*, 3rd ed. Newyork USA, McGraw-Hill, (2006).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

## Çevre ve şehircilik bakanlığı hizmet binası konferans salonuna yönelik akustik performans çalışması

### *Acoustic performance study for the conference hall of ministry of environment and urbanization service*

*Yazar(lar) (Author(s)): Füsun DEMİREL<sup>1</sup>, Sebahat Gül İLİSULU<sup>2</sup>, Zuhâl ÖZÇETİN<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-8217-4797*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-9381-5908*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-4441-9471*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Demirel F., İlisulu S. G. ve Özçetin Z., “Çevre ve şehircilik bakanlığı hizmet binası konferans salonuna yönelik akustik performans çalışması”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 47-53, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.389582

# Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Hizmet Binası Konferans Salonuna Yönelik Akustik Performans Çalışması

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Füsun DEMİREL<sup>1</sup>, Sebahat Gül İLİSULU<sup>2</sup>, Zuhale ÖZÇETİN<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Güzel Sanatlar, Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Başkent Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Siirt Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 16.12.2016 ; Kabul/Accepted : 26.02.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Hizmet Binası Konferans Salonu'nun\*; konuşma işlevine yönelik akustik koşulların sağlanabilmesi için geliştirilen akustik tasarım analizleri ve değerlendirilmeleri yapılmıştır. Hacim akustiğine yönelik olarak yapılan analizler ışığında; konferans salonuna ülkemizde yürürlükte olan yönetmelikler ve uluslararası standartlara uygun akustik konfor koşullarının sağlanmasına ilişkin öneriler geliştirilmiştir. Getirilen bu öneriler sonucunda; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Hizmet Binası Konferans Salonu'nda konferans işlevine yönelik, ulusal/uluslararası mevzuatlarda önerilen akustik koşullar sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Konferans salonu, mimari akustik, hacim akustiği, hizmet binası.

## Acoustic Performance Study For The Conference Hall of Ministry of Environment and Urbanization Service

### ABSTRACT

Solar air collectors (SAC) are usually used for space heating and drying of agricultural products. In this study, acoustic design analyzes and evaluations were carried out in order to improve acoustical conditions of the Ministry of Environment and Urbanization Service Building Conference Hall\* for speech function. In the light of the analysis on the room acoustics, recommendations have been developed for the conference hall to provide acoustic comfort conditions in accordance with the regulations in force in our country and international standards. As a result of these suggestions, the acoustic conditions for conference function recommended in national/international legislation have been provided in the Conference Hall of the Ministry of Environment and Urbanization Service Building.

**Keywords:** Conference hall, architectural acoustics, room acoustics, service building

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Konferans salonlarının akustik tasarımında; konuşmanın anlaşılabilirliği (STI), belirginliği (D50), reverberasyon süresi (T30), erken sönümlenme süresi (EDT), ses basınç seviyesi farkı ( $\Delta$ SPL) gibi önemli akustik parametrelerin değerlendirilmesi ve uygun değerlere getirilmesi hedeflenmelidir. Bu bağlamda çalışmada; 600 kişilik izleyici kapasiteli Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (Ç.Ş.B.) Hizmet Binası Konferans Salonu'nun; konuşma işlevine yönelik olarak, geliştirilen akustik tasarımların, analiz ve değerlendirmeleri yapılmıştır. Söz konusu konferans salonunun analizleri için; Türkiye'de yürürlükte olan yönetmeliklerin, uluslararası standartların önerdiği akustik konfor koşullarının sağlanmasına ilişkin öneriler geliştirilmiştir. Bu öneriler sonucunda; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (Ç.Ş.B.) Hizmet Binası Konferans

Salonu'nda; konferans işlevine yönelik, ulusal/uluslararası mevzuatlarda önerilen akustik koşullar sağlanabilmiştir.

### 2. AMAÇ VE YÖNTEM (AIM AND METHOD)

Konferans işlevi için hacim akustiğine yönelik olarak çalışmanın amacı;

- mekân içerisinde konuşmanın anlaşılabilirliğinin sağlanması,
- yankı (eko) gibi önemli akustik problemlerin önlenmesidir.

Bu çalışmada yöntem olarak; Ç.Ş.B Hizmet Binası Konferans Salonu'nda ihtiyaç duyulan akustik koşulların hacim akustiğine yönelik analizleri için, ODEON (V 10.02 Combined) hacim akustiği simülasyon programı kullanılmıştır [1]. Bu bağlamda;

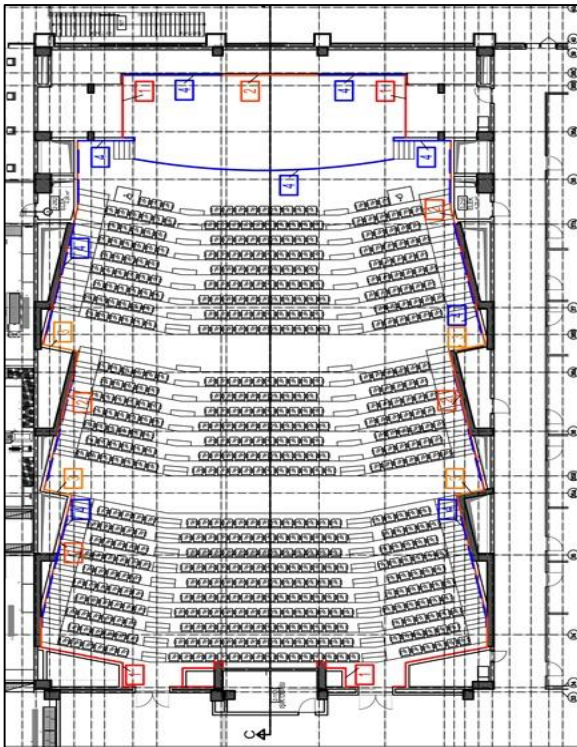
\* Zuhale Özçetin (Corresponding Author)  
e-posta : zuhalozcetin@gmail.com

### 3. Ç.Ş.B. HİZMET BİNASI KONFERANS SALONU'NUN AKUSTİK TASARIMI, ANALİZİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ (ACOUSTIC DESIGN, ANALYSIS AND EVALUATION FOR THE CONFERENCE HALL OF MINISTRY OF ENVIRONMENT AND URBANIZATION SERVICE)

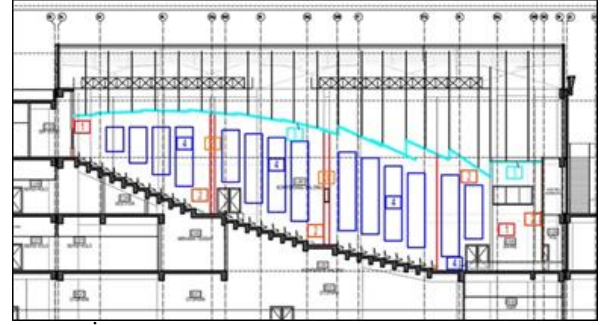
Ç.Ş.B Hizmet Binası Konferans Salonu, hacim içindeki akustik konfor düzeyine yönelik olarak geliştirilen tasarım kararlarının, hacmin akustik performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Geliştirilen tasarım kararlarının, salondaki ses düzeyinin kalitesini ve konuşmanın anlaşılabilirliğini olumsuz yönde etkileyen yankı / eko ve tekrarlanan eko gibi akustik problemlere yol açmamasına, yansıtıcı duvar ve asma tavan yüzeylerinin; direkt sesi destekleyen ses yansımalarını sağlamaya yönelik olarak tasarlanmasına dikkat edilmiştir.

#### 3.1. Ç.Ş.B. Tarafından Kullanılması İstenilen İç Yüzey Malzemeleri ile Akustik Simülasyon Sonuçları ve Değerlendirilmesi (Results and Evaluation of Acoustic Simulation with Interior Materials Required to be Used Ç.Ş.B.)

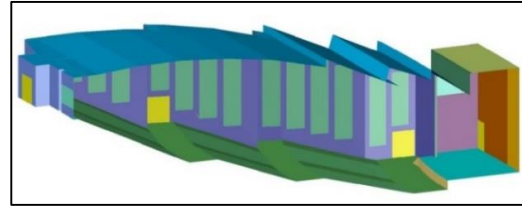
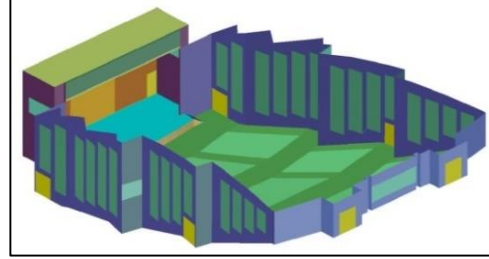
Ç.Ş.B Hizmet Binası Konferans Salonu; Bakanlık tarafından konuşma amaçlı ve seslendirme sistemi ile birlikte kullanılması planlanmıştır. Bu bağlamda, konuşma işlevinin akustik açıdan uygun koşullarda yerine getirilebilmesi amacıyla salon tasarımının, Ç.Ş.B. tarafından istenilen iç yüzey malzemeler doğrultusunda, akustik açıdan yeterliliğinin irdelenmesi için, ODEON hacim akustiği simülasyon programı ile analizi ve değerlendirmeleri yapılmıştır (Şekil 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 ve Çizelge 3.1).



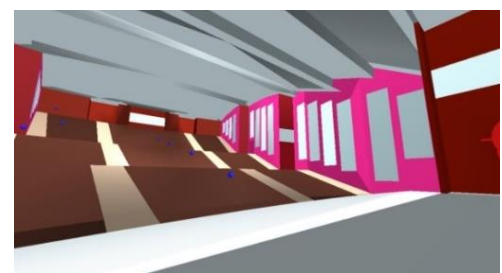
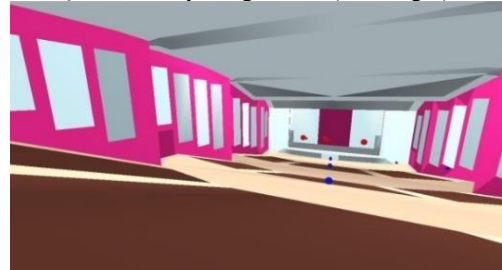
Şekil 1. Konferans salonu yüzeylerinde kullanılması istenilen iç yüzey malzemelerin planda gösterilmesi (Showing of the interior surface materials desired to be used on the conference hall surfaces)



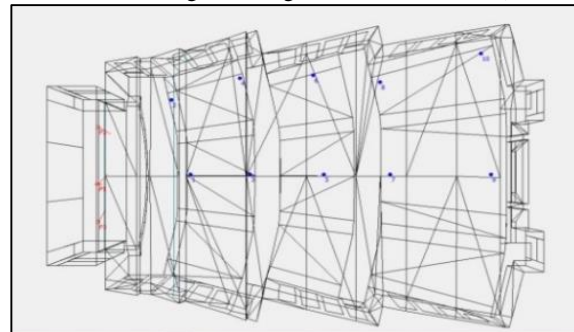
Şekil 2. İç yüzey malzemelerin kesitte gösterilmesi (Showing the cross section of the inner surface material)



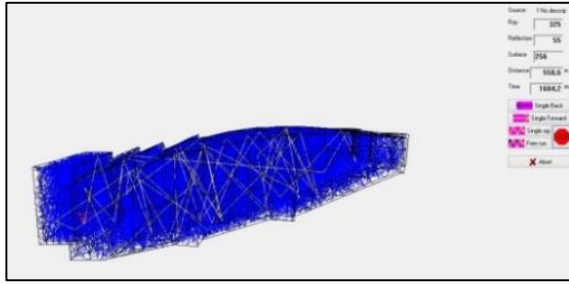
Şekil 3. 3 boyutlu görseller (3D images)



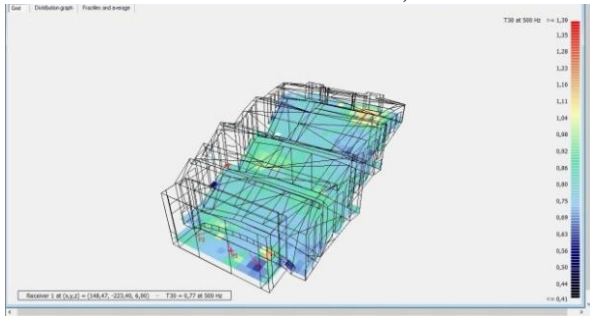
Şekil 4. Salondan sahneye, sahneden salona bakış (The hall from the stage, the stage of the hall overview)



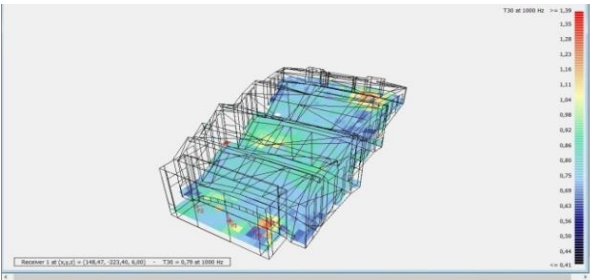




Şekil 5. Hacim içi yansıyan seslerin ışın analizi (Ray analysis of the reflected sound in volume)

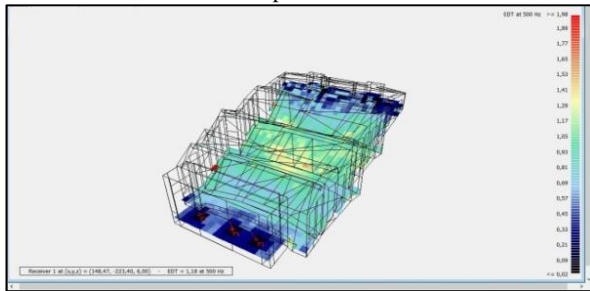


500 Hz

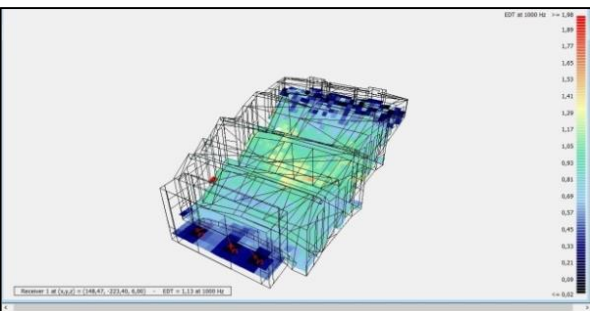


1000 Hz

Şekil 6. Konferans salonunda reverberasyon süresi (T30) parametresinin dağılımı (Distribution of the reverberation time parameter in the conference room)

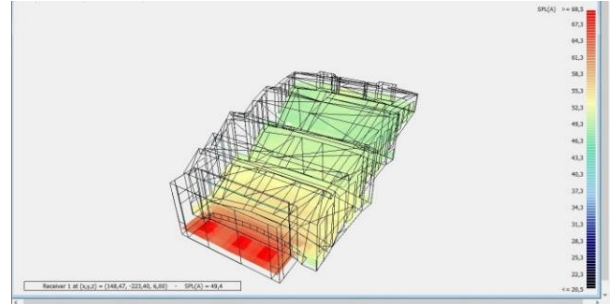


500 Hz

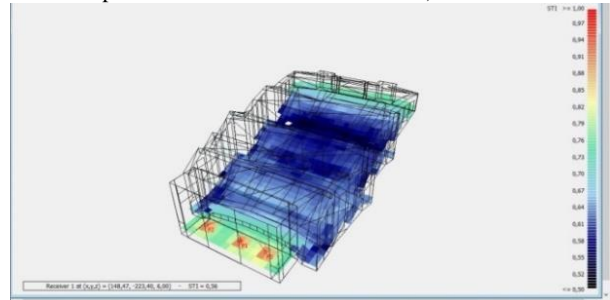


1000 Hz

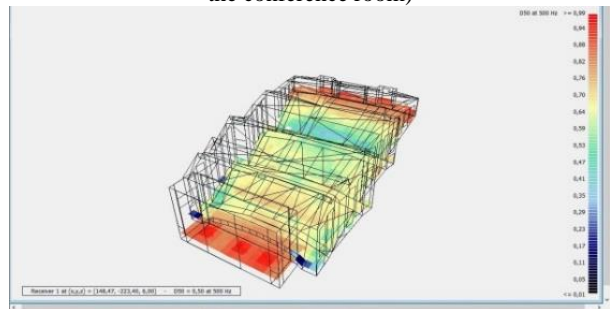
Şekil 7. Konferans salonunda erken sönümlenme süresi (EDT) parametresinin dağılımı (Distribution of the EDT parameter in the conference room)



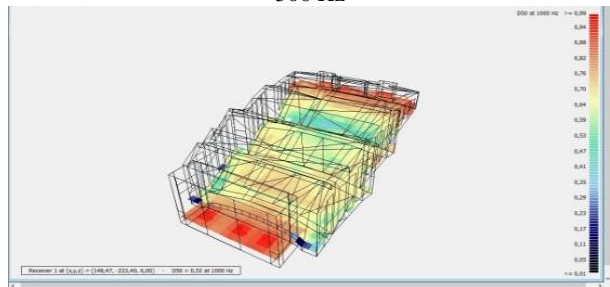
Şekil 8. Konferans salonunda ses basınç seviyesi SPL(A) parametresinin dağılımı (Distribution of the SPL(A) parameter in the conference room)



Şekil 9. Konferans salonunda konuşmanın iletim indeksi (STI) parametresinin dağılımı (Distribution of the STI parameter in the conference room)



500 Hz



1000 Hz

Şekil 10. Konferans salonunda konuşmanın belirginliği (D50) parametresinin dağılımı (Distribution of the D50 parameter in the conference room)

- Salonun üç boyutlu “simülasyon modeli” oluşturulmuş, ODEON programına aktarılarak, geliştirilen akustik tasarımların analizleri yapılmıştır.
- Geliştirilen öneriler sonucunda elde edilen verilerin, ülkemiz yönetmelik ve ulusal/uluslararası mevzuatlar ile karşılaştırmaları yapılarak, tasarımların doğruluğu kanıtlanmıştır.

**Çizelge 1.** ÇŞB Hizmet Binası Konferans Salonu'nda kullanılması istenilen iç yüzey malzemelerin ses yutma katsayıları  
(Moisture absorption coefficients of inner surface materials desired to be used in the Ç.Ş.B. the conference hall)

<b>Ses Yutma Katsayıları (Sound Absorption Coefficients) [1]</b>							
<b>63 Hz</b>	<b>125 Hz</b>	<b>250 Hz</b>	<b>500 Hz</b>	<b>1000 Hz</b>	<b>2000 Hz</b>	<b>4000 Hz</b>	<b>8000 Hz</b>
<b>SALON DÖŞEME</b>							
0.09000	0.09000	0.08000	0.21000	0.26000	0.27000	0.37000	0.37000
<b>SALON İZLEYİCİ</b>							
0.62000	0.62000	0.72000	0.80000	0.83000	0.84000	0.85000	0.85000
<b>SALON ASMA TAVAN (5)</b>							
0.18000	0.18000	0.12000	0.10000	0.09000	0.08000	0.07000	0.07000
<b>SALON ARKA DUVAR (1)</b>							
0.48000	0.48000	0.84000	0.96000	0.97000	1.01000	1.04000	1.04000
<b>SALON KISA DUVAR (3)</b>							
0.53000	0.53000	0.68000	0.84000	0.87000	0.82000	0.74000	0.53000
<b>SALON YAN - ÖN DUVAR (4)</b>							
0.25000	0.25000	0.15000	0.10000	0.09000	0.08000	0.07000	0.07000
<b>SALON YAN DUVAR (2)</b>							
0.10000	0.10000	0.44000	0.96000	1.00000	0.60000	0.48000	0.48000
<b>SAHNE ALIN (4)</b>							
0.25000	0.25000	0.15000	0.10000	0.09000	0.08000	0.07000	0.07000
<b>SAHNE DÖŞEME</b>							
0.15000	0.15000	0.11000	0.10000	0.07000	0.06000	0.07000	0.07000
<b>SAHNE ASMA TAVAN (5)</b>							
0.18000	0.18000	0.12000	0.10000	0.09000	0.08000	0.07000	0.07000
<b>YAN SAHNE DUVAR (1)</b>							
0.48000	0.48000	0.84000	0.96000	0.97000	1.01000	1.04000	1.04000
<b>ARKA SAHNE DUVAR (2)</b>							
0.10000	0.10000	0.44000	0.96000	1.00000	0.60000	0.48000	0.48000
<b>ARKA SAHNE DUVAR (4)</b>							
0.25000	0.25000	0.15000	0.10000	0.09000	0.08000	0.07000	0.07000
<b>SALON CAM YÜZEYLER</b>							
0.10000	0.10000	0.44000	0.96000	1.00000	0.60000	0.48000	0.48000

**Çizelge 2.** ÇŞB Hizmet Binası Konferans Salonu'nda kullanılması istenilen iç yüzey malzemeleri ile geliştirilen tasarımın hacim akustiği açısından analiz sonuçları ve değerlendirilmesi (Analysis results and evaluation in terms of volume acoustics of the design developed with desired interior materials desired to be used in the Ç.Ş.B. the conference hall)

Hacim Akustiği Parametreleri	Optimum Değerler	Kullanılması İstenilen Malzemelerle Analiz Sonuçları	Hissedilen Fark (JND)	Değerlendirme
T <sub>30,mid</sub> Reverberasyon Süresi, sn (Reverberation Time)	$0,71 \leq T_{30,mid} \leq 1,05$ (500 Hz - 1000 Hz) [2]	0.82	%5	UYGUN
EDT Erken Sönümlenme Süresi, sn (Early Decay Time)	$EDT < T_{30,mid}$ (500 Hz - 1000 Hz) [2]	0.80	%5	UYGUN
$\Delta$ SPL Ses Basınç Seviyesi Farkı, dB (Sound Pressure Level)	$\Delta$ SPL < 10 dB [2]	5.7	2 dB	UYGUN
STI Konuşmanın İletim İndeksi (Speech Transmission Index)	$0,60 <  Y  < 0,75$ [3]	0.63	-	UYGUN
D <sub>50</sub> Konuşmanın Belirginliği (Definition)	D <sub>50</sub> > 0,50 tüm frekanslarda [2]	125 Hz 0.43	%5	UYGUN DEĞİL
		250 Hz 0.55		UYGUN
		500 Hz 0.66		UYGUN
		1000 Hz 0.68		UYGUN
		2000 Hz 0.61		UYGUN
		4000 Hz 0.65		UYGUN

#### 4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME (CONCLUSION AND EVALUATION)

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Hizmet Binası Konferans Salonu'nda; konuşma işlevi için sağlanması gereken akustik koşullar, hacim akustiğine yönelik olarak analiz edilmiş, ülkemizde yürürlükte olan yönetmelik, ulusal/uluslararası standartlarda ve literatürde önerilen hacim akustiği parametrelerine göre değerlendirilmiştir.

Konuşma işlevinin akustik açıdan uygun koşullarda yerine getirebilmesi için Ç.Ş.B. Hizmet Binası Konferans Salonu'nun tasarımı; öncelikle Bakanlık tarafından kullanılması istenen iç yüzey malzemeleri doğrultusunda akustik açıdan yeterliliği irdelenmiştir. Ancak, "Teknik Şartname" de yer alan iç yüzey malzemeleri, konuşmanın anlaşılabilirliğini etkileyen bas seslerde (125 Hz), "konuşmanın belirginliği (D50)" parametresini yerine

getirmede yetersiz kalmış ve salonun, akustik açıdan tüm "uygun akustik parametrelerini" bir arada sağlayamadığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, Ç.Ş.B. Hizmet Binası Konferans Salonu, önerilen yeni iç yüzey malzemeleri kullanılarak, akustik açıdan tekrar tasarlanmış ve konferans işlevine yönelik "uygun akustik tasarım parametrelerinin" tümü, bir arada sağlanabilmiştir. Her iki durumu gösteren tablo; Çizelge 4.'de yer almaktadır.

Yapılan bu analizler ve değerlendirmeler ışığında; Ç.Ş.B. Hizmet Binası Konferans Salonu'nda gerçekleştirilecek olan konuşma işlevine yönelik olarak geliştirilen tasarıma ilişkin elde edilen parametreler, ulusal/uluslararası mevzuat ile karşılaştırıldığında, elde edilen "uygun" kriterler ile önerilen tasarımın doğruluğu kanıtlanmıştır (Çizelge 4).

**Çizelge 3.** Ç.Ş.B. Hizmet Binası Konferans Salonu’nda kullanılması istenilen ve önerilen iç yüzey malzemeleriyle geliştirilen tasarımların hacim akustiği açısından analizi ve sonuçlarının değerlendirilmesi (Analysis results and evaluation in terms of volume acoustics of the design developed with desired interior materials desired to be used in the Ç.Ş.B. the conference hall)

Hacim Akustiği Parametreleri	Optimum Değerleri	Hissedilen Fark (JND)	SEÇENEK-1 (Kullanılması İstenilen Malzemelerle Analiz Sonuçları)	Değerlendirme	SEÇENEK-2 (ÖNERİLEN) (Kullanılması Önerilen Malzemelerle Analiz Sonuçları)	Değerlendirme
$T_{30mid}$ Reverberasyon Süresi, sn (Reverberation Time)	$0,71 \leq T_{30mid} \leq 1,05$ (500 Hz – 1000 Hz) [2]	%5	0,82	UYGUN	0,83	UYGUN
EDT Erken Sönümlenme Süresi, sn (Early Decay Time)	$EDT < T_{30mid}$ (500 Hz – 1000 Hz) [2]	%5	0,80	UYGUN	0,81	UYGUN
$\Delta$ SPL Ses Basınç Seviyesi Farkı, dB (Sound Pressure Level)	$\Delta$ SPL < 10 dB [2]	2 dB	5,7	UYGUN	6,1	UYGUN
STI Konuşmanın İletim İndeksi (Speech Transmission Index)	$0,60 < iYI < 0,75$ [3]	-	0,63	UYGUN	0,65	UYGUN
$D_{50}$ Konuşmanın Belirginliği (Definition)	$D_{50} > 0,50$ Tüm frekanslarda [2]	%5	125 Hz 0,43	UYGUN DEĞİL	125 Hz 0,58	UYGUN
			250 Hz 0,55	UYGUN	250 Hz 0,61	UYGUN
			500 Hz 0,66	UYGUN	500 Hz 0,65	UYGUN
			1000 Hz 0,68	UYGUN	1000 Hz 0,66	UYGUN
			2000 Hz 0,61	UYGUN	2000 Hz 0,67	UYGUN
			4000 Hz 0,65	UYGUN	4000 Hz 0,70	UYGUN

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Odeon A/S, “Room Acoustics Modelling Software, V 10.02 Combined”, Denmark, (2009).
- [2] Demirel, F., “Mimari Akustik Yayınlanmamış Ders Notları”, Gazi Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, Ankara, (2016).
- [3] TS EN 60268-16: 2012-01, “Ses sistem cihazları -Bölüm 16: Konuşma iletim indeksi ile konuşma anlaşılabilirliğinin tarafsız sınıflandırılması”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2012).
- [4] Çevre ve Orman Bakanlığı, “Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği”, *Çevre ve Orman Bakanlığı Raporu*, 2002/49/EC, Ankara, 1-27, (2012).
- [5] İLİSULU, G., (Tez yürütücüsü: Prof. Dr. Füsün Demirel), “Tiyatro Salonlarının Akustik Açısından Değerlendirilmesi Ve Bir Örnek Çalışma: İstanbul Büyükşehir Belediyesi Beyoğlu Sahnesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2010).
- [6] ÖZÇETİN Z., (Tez yürütücüsü: Prof. Dr. Füsün Demirel), “Konservatuvar Binalarının Gürültü Kontrolü Açısından Analizi ve Bir Örnek Çalışma: Ankara Musiki Muallim Mektebi Konservatuvar Binası”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2011).
- [7] Beranek, L., “Concert Halls and Opera Houses Music Acoustics and Architecture”, 2nd ed., Springer Verlag Inc., New York, (2004).
- [8] TS EN ISO 3382-1, “Akustik, Odaların Akustik Parametrelerinin Ölçülmesi, Bölüm 1: Performans Boşlukları”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Türkiye, 1-26 (2010).
- [9] Thiele, R., (1956). “Die Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen - Directional distribution and time sequence of sound reflections in rooms”, *Acustica*, 1: 31-32.
- [10] Türkmen, R., (Tez yürütücüsü: Prof. Dr. Füsün Demirel), “Oditoryumlarda Akustik Performansın İyileştirilmesine Yönelik Tasarım Parametrelerinin Geliştirilmesi ve Bir Örneklem”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2013).

### **Ek 1: Tanımlar**

**Reverberasyon süresi (T30):** Kapalı bir hacim içerisinde, ses kaynağı kapatıldıktan sonra, ses basınç seviyesinin, 60 dB azalması ya da sönümlenmesi için geçen süre olarak tanımlanan reverberasyon süresi; hacim akustiği için en önemli parametrelerden biridir [2,7,8,10].

**Erken Sönümlenme Süresi (EDT):** Kapalı bir hacim içerisinde, ses kaynağı kapatıldıktan sonra, ses basınç seviyesinin, 10 dB azalması ya da sönümlenmesi için geçen sürenin, 6 ile çarpılması sonucunda elde edilen, ses basınç seviyesindeki sönümlenmenin ilk evresini ifade etmektedir [2,7,10].

**Konuşmanın Belirginliği (D50):** Konuşmanın belirginliği (D50); konuşmanın anlaşılabilirliğine (intelligibility quality of speech performances) yönelik olarak geliştirilen hacim akustiği parametresidir. [2,9].

**Konuşmanın iletim indeksi (STI):** konuşmanın iletim kanalı ile, konuşmanın iletim niteliğine dayalı olarak, konuşmanın anlaşılabilirliğinin ölçülmesine yönelik geliştirilmiş olan akustik parametredir [7]



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

# Linyit üretim prosesinin ekserjitik değerlendirilmesi: SLİ örneği

## *Exergetical evaluation of lignite production process: SLI case study*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Merve ŞENTÜRK ACAR<sup>1</sup>, Mehmet SARAYDAR<sup>2</sup>, Oğuz ARSLAN<sup>3</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0003-1442-4560

*ORCID<sup>2</sup>:* xxxx-xxxx-xxxx-xxxx

*ORCID<sup>3</sup>:* 0000-0001-8233-831X

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Acar M.Ş., Saraydar M. ve Arslan O., “Linyit üretim prosesinin ekserjitik değerlendirilmesi: SLİ örneği”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 55-63, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.389583

# Linyit Üretim Prosesinin Ekserjitik Değerlendirmesi: SLİ Örneği

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Merve ŞENTÜRK ACAR<sup>1\*</sup>, Mehmet SARAYDAR<sup>2</sup>, Oğuz ARSLAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Kütahya, Türkiye

<sup>2</sup>Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, Türkiye

<sup>3</sup>Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye

(Geliş/Received : 16.12.2016 ; Kabul/Accepted : 02.02.2017)

## ÖZ

Günümüzde enerji ihtiyacının artması ve çevresel etkenler, yeni enerji kaynaklarının araştırılmasını ve hali hazırda kullanılmakta olan enerji üretim teknolojilerinin değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Ülkemizde bulunan linyit rezervlerinin büyük bir bölümünü düşük ısı değerli kaynaklar oluşturmaktadır. Bu durum, kaynakların termik santrallerde kullanımını gerekli kılmaktadır. Termik santrallerde kullanılan ve piyasaya arz edilen linyitlerin temin edildiği işletmeler arasında Kütahya İli'nde bulunan Seyitömer Linyit İşletmesi yer almaktadır. Bu çalışmada, linyitin çıkarılması ve işlenmesi prosesi ekserji analiz metodu ile incelenmiş olup, prostesteki kayıplar tespit edilmiştir. Analiz sonucunda, en büyük kayıpların kömür yıkama tesisi ve kömürün çıkarılması ve taşınmasında meydana geldiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji, ekserji, linyit üretimi, Seyitömer.

# Exergetical Evaluation of Lignite Production Process: SLI Case Study

## ABSTRACT

Today, increasing energy demand and environmental factors make it necessary to investigate new energy sources and to evaluate currently used energy production technologies. Most of the lignite reserves in our country form low thermal value sources. This necessitates the use of resources in thermal power plants. Seyitömer Lignite Plant located in Kütahya Province is among the enterprises that are used in thermal power plants and supplied lignite to the market. In this study, the extraction and processing of lignite was investigated by the exergy analysis method, and the losses in the process were determined. As a result of the analysis, it was determined that the biggest losses occurred in the coal washing plant and the removal and transport of the cargo.

**Keywords:** Energy, exergy, lignite production, Seyitömer

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde enerji ihtiyacının artması ve çevresel etkenler, yeni enerji kaynaklarının araştırılmasını ve hali hazırda kullanılmakta olan enerji üretim teknolojilerinin değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Ülkemizde enerji ihtiyacının büyük bir bölümü dış kaynaklardan sağlanmaktadır. Dışa bağımlı enerji tüketimi, ülke ekonomisini olumsuz yönde etkilemektedir. Ülkemizde, brüt elektrik enerjisi üretiminin % 21,9'u termik santrallerden, % 12,3'ü yerli kömür kullanılan termik santrallerden ve % 29,2'si doğalgaza dayalı santrallerden sağlanmaktadır [1, 2].

Ülkemiz linyit kaynaklarının büyük bir bölümünü düşük ısı değerli rezervlerin oluşturması, linyitin termik santrallerde kullanımını arttırmıştır. Aynı zamanda ekonomik etkenler ve dışa bağımlılık gibi nedenler, enerji üretiminde yerli kaynakların kullanılmasının önemini arttırmaktadır. Bu nedenlerden dolayı ülkemizde yapılan sondaj çalışmaları artmış ve 2005-

2012 yılları arasında yaklaşık 5,8 Milyar ton rezerv artışı sağlanmıştır [1].

Literatürde, linyit içerisindeki kükürdün farklı metodlar kullanılarak giderilmesine yönelik çalışmalar mevcuttur [3, 4]. Ancak, linyitin rezervden çıkarılması ve işlenmesi prosesine ait enerji ve ekserji analizinin yapıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Rosen ve Dinçer (1999), atık emisyonlara ekserji analizi uygulamışlardır [5]. Lobachyov ve Ritcher (1996), kömür yakıtlı güç santralleri için ekserji analizine dayalı bir verimlilik çalışması yapmışlar, yaklaşık %63 düzeyinde bir termal verimlilik saptamışlardır [6].

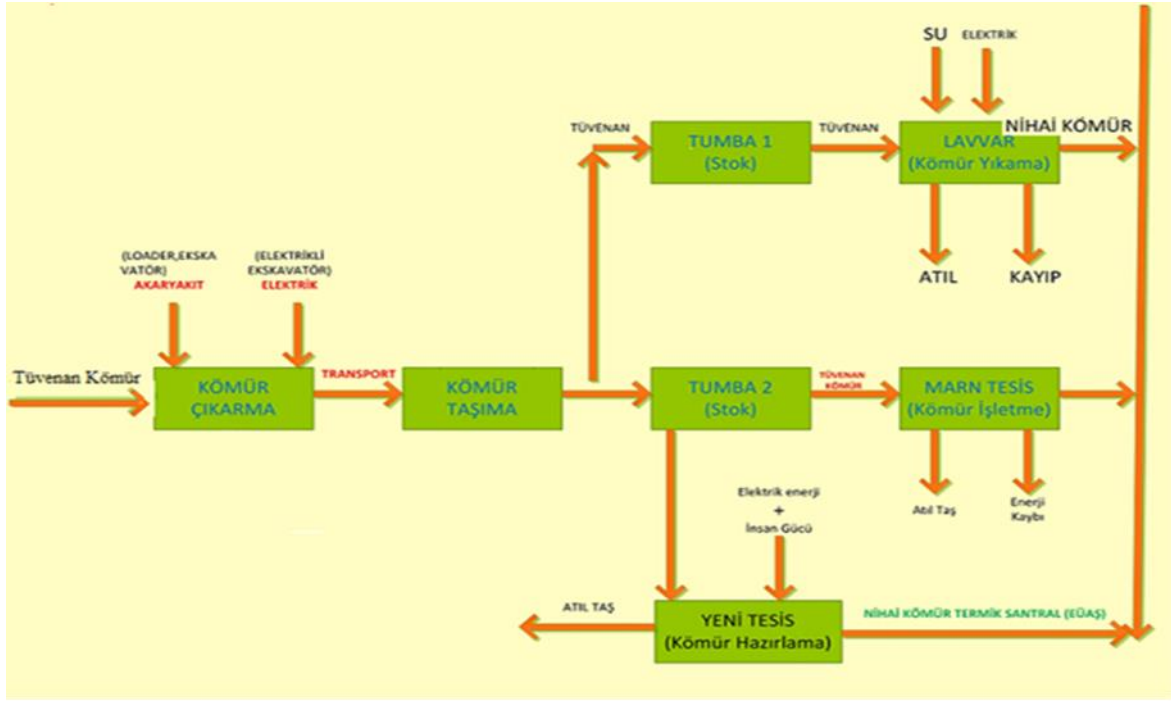
## 2. SEYİTÖMER LİNYİT İŞLETMESİ KÖMÜR ÇIKARTMA VE İŞLEME PROSESİ (SEYİTÖMER LİNYİT BUSINESS COAL REMOVAL AND PROCESSING PROCESS)

1960 yılında faaliyete başlanan Seyitömer Linyit işletmesinde yıllık 600.000 ton tüvenan linyit istihali programlanmış ve Seyitömer'de 600 MW gücüne çıkartılan santrale paralel olarak işletmenin üretim

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

kapasitesi 7.700.000 ton/yıl tüvenan linyit istihsalı olacak şekilde tevsi edilmiştir.

Seyitömer Linyitleri İşletmesi, piyasanın ve EÜAŞ santralinin kömür talebini karşılamak amacıyla kurulmuştur. Şekil 1'de Seyitömer Linyit sahasının konumu görülmektedir [7].



Şekil 1. Kömür üretim akış şeması [7]. (Flow diagram of coal production.)

Seyitömer Linyit İşletmeleri yerüstü madencilik yapıldığı ve yaklaşık 150 milyon ton kömür rezervine sahip bir kurumdur. Kömür üretimi ilk olarak toprak üstü örtünün alınması ve açılan kömürün elektrikli ve dizel motora sahip ekskavatörlerle 85 ton kapasiteli Wabco marka ağır kamyonlara sarılması ile başlamaktadır [7]. Şekil 1 incelendiğinde, kömür üretiminin 3 aşamada gerçekleştiği görülmektedir. Birinci aşama, kömürün kaynaktan çıkarılması ve araçlarla taşınmasının ardından, tumbalara dökülmesidir. İkinci aşama, lavvar tesisinde kömürün içindeki toprak ve tozun yıkama yardımıyla temizlenmesidir. Son aşama ise kömürün kullanım amacına bağlı olarak, ısıl değerinin artırılması için işlenmesidir. EÜAŞ termik santraline gönderilecek kömür ise Marn ve Yeni tesis adı ile adlandırılan kömürün taşından ve toprağından ayrıldığı kömür ayıklama tesislerinde tane boyutlarına göre üretim yapılır [7].

### 3. LİNYİT ÇIKARTMA VE İŞLEME PROSESİNİN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ (ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF LIGNITE DISCHARGE AND PROCESSING PROCESS)

Ekserji analizinde sistem içerisindeki tersinmezlik noktaları ve kullanılan enerjinin ne kadarının yararlı işe dönüştürüldüğü belirlenmektedir. Bir sistemdeki enerji

kayıplarının, tersinmezliklerin ve sistem içerisinde yapılabilecek iyileştirmelerin belirlenebilmesi için enerji ve ekserji analizlerinin birlikte yapılması gerekmektedir. Sürekli akışlı açık bir sistem için enerji dengesi Eş. (1)'de verildiği gibidir [8];

$$Q - W + \sum E_g - \sum E_c = \Delta E_{kh} \quad (1)$$

burada,  $Q$ ; sisteme giren veya çıkan ısıyı,  $W$ ; sisteme giren ya da çıkan işi,  $E_g$ ; kütle ile birlikte enerji girişini,  $E_c$ ; kütle ile birlikte enerji çıkışını ve  $\Delta E_{kh}$ ; kontrol hacmindeki enerji değişiminin ifade etmektedir. Eş. (1) tekrar düzenlenir ise [8];

$$Q - W = \sum m_c (h_c + V_c^2 + g \cdot z_c) - \sum m_g (h_g + V_g^2 + g \cdot z_g) \quad (2)$$

ifadesi elde edilir. Burada,  $V$ ; hızı,  $z$ ; yüksekliği ve  $h$ ; özgül entalpiyi ifade etmektedir. Elektrik, manyetizma, yüzey gerilimi ve nükleer reaksiyon gibi parametreler ihmal edildiğinde, herhangi bir sistemin ekserji dengesi;

$$Ex_g - Ex_c = Ex_y \quad (3)$$

eşitliği ile verilmektedir [8]. Isı etkileşimi ( $Ex_{ısı}$ ), iş etkileşimi ( $Ex_{iş}$ ), ve kütle akışı ile giren ( $Ex_{kütle,g}$ ) ve çıkan ( $Ex_{kütle,c}$ ) ekserjilere bağlı olarak, Eş. (3) tekrar düzenlenirse;

$$Ex_{iş} + Ex_{kütle,g} - Ex_{kütle,c} + Ex_{ısı} = Ex_y \quad (4)$$

şeklini alır. Burada;

$$Ex_{ısı} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) Q_k \quad (5)$$

$$Ex_{iş} = W \quad (6)$$

$$Ex_{kütle} = \sum (m \cdot (\Psi))_g \quad (7)$$



ifadesiyle verilir [8].  $Q_k$ ;  $T_k$  sıcaklığındaki sistem sınırlarında transfer edilen ısı ve  $W$ ; iş olup, özgül ekserji ( $\psi$ ) ise;

$$\psi = \psi^{PH} + \psi^{KN} + \psi^{PT} + \psi^{CH} \quad (8)$$

şeklinde verilir [8]. Burada,  $\psi^{PH}$ ; fiziksel ekserjiyi,  $\psi^{KN}$ ; kinetik ekserjiyi,  $\psi^{PT}$ ; ekserjiyi ve  $\psi^{CH}$ ; kimyasal ekserjiyi ifade etmektedir. Bu terimler sırasına göre daha net bir ifadeyle;

$$\psi = ((h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0)) + \frac{v^2}{2} + g \cdot z + (\beta_{AID} \cdot AID_{yakıt}) \quad (9)$$

şeklinde verilir [8-10]. Burada,  $h$ ; entalpi,  $s$ ; entropi,  $o$ ; alt indisi ise referans çevre özelliklerini tanımlamaktadır. Referans çevre sıcaklığı ( $T_0$ ) 298,15 K, özgül nemi ( $\omega_0$ ) 0,02023 ve basıncı ( $P_0$ ) 101,325 kPa olarak hesaplamalara dahil edilmiştir [9]. Katı, sıvı ve gaz yakıtların kimyasal enerjileri, yakıtın kimyasal bileşiminden faydalanılarak hesaplanabilir. Tüm petrol bazlı yakıtların kimyasal ekserjileri [10];

$$\beta_{AID} = \frac{E_x^{CH}}{AID} \quad (10)$$

$$\beta_{ÜID} = \frac{E_x^{CH}}{ÜID} \quad (11)$$

burada;  $\beta$  faktörü alt ısı değer (AID) ve üst ısı değere (ÜID) bağlı olup, yakıtların kütle oranı hesabındaki

eşitliği ile verilmektedir [12, 13]. Motorin için alt ısı değer 42.697 (kJ/kg) olarak hesaplamalara dahil edilmiştir [14]. Kimyasal bileşimi bilinmeyen sıvı yakıtlar için kütleli karışım oranları, yakıtın AID'ye bağlı olarak aşağıdaki eşitlikler kullanılarak elde edilir [15, 16].

$$Z_C = 0,64241 + 0,00504 \cdot AID \quad (14)$$

$$Z_{H_2} = -0,22426 + 0,00826 \cdot AID \quad (15)$$

$$Z_S = 0,2763 - 0,00628 \cdot AID \quad (16)$$

$$Z_{O_2} = 0,30582 - 0,00702 \cdot AID \quad (17)$$

Kimyasal bileşimi bilinmeyen kömür için kütleli karışım oranları, yakıtın nem, kül ve AID'ne bağlı olarak aşağıdaki eşitlikler kullanılarak elde edilir [15, 16];

$$Z_C = 0,04685 \cdot (1 - Z_k - Z_w) + 0,02411 \cdot (AID + 2,442 \cdot Z_w) \quad (18)$$

$$Z_{H_2} = 0,08635 \cdot (1 - Z_k - Z_w) - 0,00112 \cdot (AID + 2,442 \cdot Z_w) \quad (19)$$

$$Z_{S_2} = 0,00047 \cdot (1 - Z_k - Z_w) + 0,00024 \cdot (AID + 2,442 \cdot Z_w) \quad (20)$$

$$Z_{O_2} = 0,86583 \cdot (1 - Z_k - Z_w) - 0,02363 \cdot (AID + 2,442 \cdot Z_w) \quad (21)$$

$$Z_{N_2} = 0,00077 \cdot (1 - Z_k - Z_w) + 0,00040 \cdot (AID +$$

**Çizelge 1.** Kömür, kamyon ve ekskavatörde kullanılan yakıtların bileşimleri [7]. (Combinations of coal and fuels used in truck and excavator.)

Madde	Sembol	Dizel yakıt (%)	Linyit (%)
Karbon	C	87,30	37,95
Hidrojen	H	12,60	2,86
Nitrojen	N	0,006	1,16
Oksijen	O	0,04	11,30
Sülfür	S	0,22	0,81
Kül	kül	0,01	10,67
Nem	w		35,24
	AID (kJ/kg)	24.151,49	7.116
	AID (kcal/kg)	5.769,58	1.699,95

istatistiksel formülasyonlar kullanılarak hesaplanır.  $Z_{O_2}/Z_C$  oranı 0,667'den küçük olan kömür için  $\beta$  faktörü;

$$\beta_{AID} = \frac{(AID + 2442 \cdot Z_w) \cdot (1,0437 + 0,1882 \cdot \frac{Z_{H_2}}{Z_C} + 0,0610 \cdot \frac{Z_{O_2}}{Z_C} + 0,0404 \cdot \frac{Z_{N_2}}{Z_C}) + 9417 \cdot Z_{S_2}}{AID} \quad (12)$$

eşitliği ile verilmektedir [11];. Sıvı yakıtlar için  $\beta$  faktörü;

$$\beta_{AID} = 1,0401 + 0,1728 \cdot \frac{Z_{H_2}}{Z_C} + 0,0432 \cdot \frac{Z_{O_2}}{Z_C} + 0,2169 \cdot \frac{Z_{S_2}}{Z_C} + (1 - 2,0628 \cdot \frac{Z_{H_2}}{Z_C}) \quad (13)$$

$$2,442 \cdot Z_w) \quad (22)$$

Kömür, kamyon ve ekskavatörde kullanılan yakıtların bileşimleri Çizelge 1'de, SLİ Müessese Müdürlüğü lavvar tesisi 2009 yılı 12 aylık fiili analiz değerleri Çizelge2'de ve termik santrale sevk edilen kömürlerin analiz değerleri Çizelge 3'te verilmiştir [7].

**Çizelge 2.** Lavvar tesisi 12 aylık fiili analiz değerleri [7]. (Actual analysis of coal washing plant 12 month.)

	TÜVENAN				ARA ÜRÜN (18-100mm)			
	Tonaj	Nem	Kül (%)	kJ/kg (kcal/kg)	Tonaj	Nem	Kül (%)	kJ/kg (kcal/kg)
Ocak	173.880	33,61	49,46	7.443 (1.778,07)	34.837	35,57	42,82	8.380 (2.001,91)
Şubat	147.100	33,23	53,46	6.681 (1.596,03)	24.352	35,47	45,32	7.991 (1.908,98)
Mart	175.830	32,97	52,83	6.811 (1.627,09)	25.858	36,40	41,03	8.602 (2.054,95)
Nisan	150.870	33,09	55,29	6.329 (1.511,94)	23.966	36,45	40,32	8.745 (2.089,11)
Mayıs	177.840	32,50	53,27	6.777 (1.618,97)	29.943	36,36	37,78	9.226 (2.204,01)
Haziran	209.550	31,72	51,14	7.384 (1.763,98)	38.303	34,59	44,72	8.209 (1.961,06)
Temmuz	197.320	31,30	53,44	6.936 (1.656,95)	46.766	33,63	49,69	7.338 (1.752,99)
Ağustos	190.170	31,84	50,08	7.380 (1.763,02)	53.821	34,99	41,09	8.841 (2.112,04)
Eylül	173.710	32,68	49,09	7.619 (1.820,11)	51.859	35,14	42,81	8.464 (2.021,98)
Ekim	211.030	33,17	48,62	7.660 (1.829,91)	56.545	34,84	41,24	8.795 (2.101,05)
Kasım	163.680	33,50	49,09	7.543 (1.801,96)	37.987	33,21	40,85	8.100 (1.935,02)
Aralık	211.200	33,01	49,72	7.505 (1.792,88)	53.819	34,19	44,20	8.389 (2.004,06)
12 Aylık	2.182.180	32,68	51,18	7.200 (1.720,02)	478.056	34,89	42,85	8.418 (2.010,99)

	TOZ TEMİZ (0,5-18mm)				PARÇA KÖMÜR (50-100mm)			
	Tonaj	Nem	Kül (%)	kJ/kg (kcal/kg)	Tonaj	Nem	Kül (%)	kJ/kg (kcal/kg)
Ocak	37.639,0	37,49	34,61	9.724 (2.322,98)	38.924,0	41,01	19,57	11.474 (2.741,04)
Şubat	27.555,0	37,25	34,95	10.113 (2.415,91)	29.330,0	40,19	22,21	11.248 (2.687,05)
Mart	35.204,0	37,49	34,93	9.578 (2.288,10)	31.037,0	40,57	20,77	11.516 (2.751,08)
Nisan	25.427,0	37,83	32,47	10.088 (2.409,94)	21.502,0	39,54	21,82	11.545 (2.758,00)
Mayıs	30.387,0	37,25	33,57	10.164 (2.428,09)	27.763,0	38,92	23,43	11.465 (2.738,89)
Haziran	46.092,0	36,39	36,89	9.326 (2.227,90)	36.808,0	37,92	22,71	11.796 (2.817,96)
Temmuz	40.935,0	36,75	41,19	8.548 (2.042,04)	33.506,0	38,12	23,17	11.637 (2.779,98)
Ağustos	34.673,0	38,03	37,82	8.933 (2.134,02)	34.995,0	38,93	21,50	11.767 (2.811,04)
Eylül	37.707,0	38,93	37,58	8.812 (2.105,11)	31.023,0	39,72	18,63	12.043 (2.876,97)
Ekim	45.698,0	38,97	37,35	8.845 (2.113,00)	39.915,0	40,05	19,05	11.947 (2.854,04)
Kasım	37.870,0	36,91	35,62	8.573 (2.048,02)	34.972,0	39,95	20,46	11.717 (2.799,09)
Aralık	46.553,0	37,86	38,92	8.765 (2.093,88)	34.348,0	39,04	23,33	11.390 (2.720,97)
Yıllık	445.740	37,55	36,62	9.184 (2.193,98)	394.123	39,50	21,31	11.641 (2.780,94)

**Çizelge 3.** Termik santrale sevk edilen kömürlerin analiz değerleri [7]. ( Analysis results ofc shipped to thermal power plant)

	EÜAŞ 1-2. Grup				EÜAŞ 1.2+3.Grup				EÜAŞ 1.2+3.4.Grup			
	Tonaj	Nem	Kül	kJ/kg (kcal/kg)	Tonaj	Nem	Kül	kJ/kg (kcal/kg)	Tonaj	Nem	Kül	kJ/kg (kcal/kg)
Ocak	268.080	34,48	48,64	7.330 (1.751,08)	478.840	34,26	49,40	7.212 (1.722,89)	625.170	34,16	49,86	7.133 (1.704,01)
Şubat	228.460	35,48	49,68	6.974 (1.666,03)	402.450	35,30	50,66	6.819 (1.629,00)	524.540	35,28	50,85	6.786 (1.621,12)
Mart	249.880	36,19	48,79	7.032 (1.679,89)	462.690	35,92	49,52	6.940 (1.657,91)	623.540	35,91	49,77	6.894 (1.646,92)
Nisan	76.070	36,02	46,86	7.439 (1.777,11)	305.360	35,71	48,33	7.204 (1.720,97)	446.510	35,81	48,28	7.196 (1.719,06)
Mayıs	141.000	34,88	50,46	6.932 (1.656,00)	317.150	34,99	50,65	6.886 (1.645,01)	474.100	34,93	50,80	6.865 (1.639,99)
Haziran	250.120	33,83	49,70	7.217 (1.724,08)	298.680	33,85	49,87	7.183 (1.715,96)	436.260	33,87	50,38	7.079 (1.691,11)
Temmuz	259.840	34,16	49,78	7.179 (1.715,00)	386.120	33,92	50,14	7.150 (1.708,07)	562.760	33,88	50,21	7.141 (1.705,92)
Ağustos	256.140	33,93	48,90	7.372 (1.761,11)	456.040	33,49	49,41	7.334 (1.752,03)	589.080	33,42	49,59	7.305 (1.745,10)
Eylül	218.410	33,70	48,77	7.397 (1.767,08)	369.550	33,45	49,51	7.296 (1.742,95)	489.590	33,25	50,14	7.200 (1.720,02)
Ekim	247.080	33,26	50,27	7.187 (1.716,91)	450.500	33,08	51,06	7.049 (1.683,95)	545.420	32,98	51,40	6.995 (1.671,05)
Kasım	240.150	33,99	49,48	7.238 (1.729,10)	445.410	34,01	49,96	7.141 (1.705,92)	514.680	33,92	50,27	7.083 (1.692,07)
Aralık	204.260	35,15	48,69	7.208 (1.721,93)	410.620	35,24	49,15	7.120 (1.700,91)	581.140	35,08	49,81	7.012 (1.675,11)
Yıllık	2.639.490	34,48	49,27	7.204 (1.720,97)	4.783.410	34,41	49,82	7.112 (1.699,00)	6.412.790	34,38	50,12	7.058 (1.686,10)

Lavvar tesisinin ekserji verimi ve ekserji giriş ve çıkış değerlerinin belirlenmesinde kullanılan  $\beta$  faktörleri Çizelge 4’te verilmiştir. Kriplaj tesisinin ekserji verimi ve ekserji giriş ve çıkış değerlerinin belirlenmesinde kullanılan  $\beta$  faktörleri Çizelge 5’te verilmiştir.

**Çizelge 4.** Kömür yıkama (lavvar) tesisleri  $\beta$  faktörleri [7]. (Coal washing plants  $\beta$  factors.)

	<b>Jüvenan</b>	<b>Ara Ürün (18-100mm)</b>	<b>Toz Temiz (0,5-18mm)</b>	<b>Kömür (50-100mm)</b>	<b>Kömür (18-50mm)</b>	<b>Parça Kömür (18-100)</b>
<b>Ocak</b>	1,206	1,198	1,186	1,178	1,178	1,178
<b>Şubat</b>	1,219	1,203	1,181	1,178	1,179	1,178
<b>Mart</b>	1,216	1,197	1,188	1,176	1,168	1,176
<b>Nisan</b>	1,227	1,195	1,183	1,174	1,173	1,174
<b>Mayıs</b>	1,214	1,189	1,183	1,173	1,174	1,173
<b>Haziran</b>	1,200	1,197	1,188	1,168	1,168	1,168
<b>Temmuz</b>	1,207	1,208	1,199	1,170	1,173	1,170
<b>Ağustos</b>	1,201	1,190	1,198	1,171	1,173	1,171
<b>Eylül</b>	1,200	1,195	1,202	1,170	1,172	1,170
<b>Ekim</b>	1,201	1,190	1,202	1,172	1,174	1,172
<b>Kasım</b>	1,204	1,194	1,199	1,173	1,175	1,173
<b>Aralık</b>	1,203	1,193	1,199	1,174	1,177	1,174

**Çizelge 5.** Kömür ayıklama ( kriplaj) tesisleri β faktörleri [7]. (Coalbreaking plant β factors)

	EÜAŞ 1-2. Grup	EÜAŞ 3. Grup	EÜAŞ 4. Grup	EÜAŞ 1.2+3. Grup	EÜAŞ 1.2+3.4. Grup
Ocak	1,211	1,214	1,217	1,213	1,214
Şubat	1,222	1,228	1,227	1,224	1,225
Mart	1,223	1,225	1,228	1,224	1,225
Nisan	1,215	1,219	1,220	1,218	1,219
Mayıs	1,220	1,223	1,222	1,222	1,222
Haziran	1,211	1,216	1,218	1,212	1,214
Temmuz	1,213	1,212	1,212	1,212	1,212
Ağustos	1,208	1,206	1,209	1,208	1,208
Eylül	1,207	1,209	1,213	1,208	1,209
Ekim	1,209	1,214	1,215	1,211	1,212
Kasım	1,211	1,215	1,219	1,213	1,214
Aralık	1,216	1,220	1,224	1,218	1,219

Linyit çıkartma ve taşıma işlemlerinin enerji denkliği Eş. (23)'te verilmiştir [7].

$$(E_{yakıt,eks} + E_{yakıt,kam} + E_{elek,eks} + E_{töv})_g - (E_{yakıt,eks} \cdot \eta_{yakıt,eks} + E_{yakıt,kam} \cdot \eta_{yakıt,kam} + E_{elek,eks} \cdot \eta_{elek,eks} + E_{töv})_ç = E_{kayıp} \quad (23)$$

$$(m_{yakıt,eks} \cdot AID_{yakıt,eks} + m_{yakıt,kam} \cdot AID_{yakıt,kam} + W_{elek,eks})_g - (m_{yakıt,eks} \cdot AID_{yakıt,eks} \cdot \eta_{yakıt,eks} + m_{yakıt,kam} \cdot AID_{yakıt,kam} \cdot \eta_{yakıt,kam} + W_{elek,eks} \cdot \eta_{elek,eks})_ç = E_{kayıp} \quad (24)$$

burada, dizel ekskavatör motoru efektif verim değeri ortalama ( $\eta_{yakıt,eks}$ ) % 36,73 olarak, dizel kamyon motoru efektif verimi ( $\eta_{yakıt,kam}$ ) % 37,5 ve elektrikli ekskavatör verimi ( $\eta_{elek,eks}$ ) % 80 olarak hesaplamalara dahil edilmiştir [7]. Linyit çıkartma ve taşıma işlemlerinin ekserji denkliği Eş. (25)'te verilmiştir [7].

$$(Ex_{yakıt,eks} + Ex_{yakıt,kam} + Ex_{elek,eks} + Ex_{töv})_g - (Ex_{yakıt,eks} \cdot \eta_{yakıt,eks} + Ex_{yakıt,kam} \cdot \eta_{yakıt,kam} + Ex_{elek,eks} \cdot \eta_{elek,eks} + Ex_{töv})_ç = Ex_y \quad (25)$$

$$(m_{yakıt,eks} \cdot AID_{yakıt,eks} \cdot \beta_{AID,eks} + m_{yakıt,kam} \cdot AID_{yakıt,kam} \cdot \beta_{AID,kam} + W_{elek,eks})_g - \left( m_{yakıt,eks} \cdot AID_{yakıt,eks} \cdot \eta_{yakıt,eks} \cdot \beta_{AID,eks} + m_{yakıt,kam} \cdot AID_{yakıt,kam} \cdot \eta_{yakıt,kam} \cdot \beta_{AID,kam} + W_{elek,eks} \cdot \eta_{elek,eks} + m_{töv} \cdot \left( \left( \frac{v_2^2}{2} \right) + g \cdot (z_2) \right) \right)_ç = Ex_y \quad (26)$$

eşitliği elde edilir. Lavvar (kömür yıkama) tesisi için enerji denkliği Eş. (27)'de verilmiştir [7].

$$(E_{töv} + E_{su} + E_{elek,tv})_g - (E_{BLI} + E_{EÜAŞ} + E_P)_ç = E_{kayıp} \quad (27)$$

$$(m_{töv} \cdot AID_{töv} + m_{su} \cdot h_{su,g} + W_{elek,tv})_g - \left( m_{BLI} \cdot AID_{BLI} + m_{EÜAŞ} \cdot AID_{EÜAŞ} + m_P \cdot AID_P \right)_ç = E_{kayıp} \quad (28)$$

Lavvar (kömür yıkama) tesisi için ekserji denkliği Eş. (29)'da verilmiştir [7].

$$(Ex_{töv} + Ex_{su} + Ex_{elek,tv})_g - (Ex_{BLI} + Ex_{EÜAŞ} + Ex_P)_ç = Ex_y \quad (29)$$

$$E_y = \left( E_{töv} \cdot \beta_{AID,töv} + W_{elek,tv} + m_{su} \cdot \left( (h_{su,g} - h_0) - T_0 \cdot (s_{su,g} - s_0) \right) \right)_g - (E_{BLI} \cdot \beta_{AID,BLI} + E_{EÜAŞ} \cdot \beta_{AID,EÜAŞ} + E_P \cdot \beta_{AID,P})_ç \quad (30)$$

Kriplaj (kömür ayıklama) tesisi enerji denkliği Eş. (31)'de verilmiştir [7].

$$(E_{töv} + E_{insan} + E_{elek,kr})_g - (E_{a.k.})_ç = E_{kayıp} \quad (31)$$

$$(m_{töv} \cdot AID_{töv} + \zeta S \cdot e_{insan} + W_{elek,kr})_g - (m_{a.k.} \cdot AID_{a.k.})_ç = E_{kayıp} \quad (32)$$

Kriplaj (kömür ayıklama) tesisi ekserji denkliği Eş. (33)'te verilmiştir [7].

$$(Ex_{töv} + Ex_{insan} + Ex_{elek,kr})_g - (Ex_{a.k.})_ç = Ex_y \quad (33)$$

$$(E_{töv} \cdot \beta_{AID,töv} + \zeta S \cdot \Psi_{insan} + W_{elek,kr})_g - (E_{a.k.} \cdot \beta_{AID,a.k.})_ç = E_y \quad (34)$$

Enerji ve ekserji verimleri ise sırasıyla Eş.(35) ve Eş. (36)'da verilmiştir.

$$\eta = \frac{E_ç}{E_g} \quad (35)$$

$$\varepsilon = \frac{Ex_ç}{Ex_g} = 1 - \frac{Ex_y}{Ex_g} \quad (36)$$

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

Kömürün çıkarılması ve araca sarılıp stok sahasına taşınması aşamasında harcanan akaryakıt enerjisi hesabında, akaryakıt dağıtım araçları üzerindeki sayaçlardan alınan değerler ve elektrikli ekskavatörlere ait elektrik tüketim değerleri işletme sayaçlarından

okunan ve yıllık maliyet analizlerinde kullanılan değerlerden oluşmaktadır. Kömür çıkarma ve taşımadaki enerji bileşenleri Çizelge 6'da ve ekserji bileşenleri Çizelge 7'de ve enerji ve ekserji giriş ve çıkış dağılım grafikleri ise sırasıyla Şekil 2 ve 3'te verilmiştir.

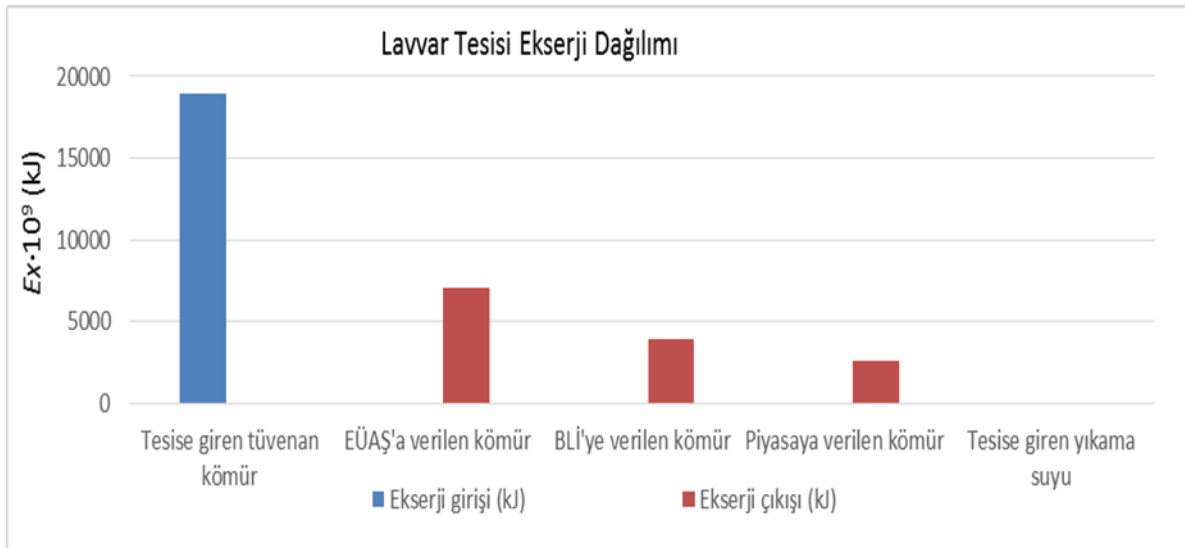
Çizelge 9'da ekserji giriş ve çıkış bileşenleri verilen Lavvar tesisinin ekserji verimi % 71,8 olarak hesaplanmıştır. Kriplaj tesisine giren tüvenan kömür, makine ve teçhizatla harcanan elektrik enerjisi ve insan gücü giren enerjiyi ve ayıklanmış kömürün enerjisi çıkan enerjiyi oluşturmaktadır. Kriplaj tesisine giren ve çıkan enerji bileşenleri Çizelge 10'da ve enerji giriş ve çıkış dağılım grafiği ise Şekil 6'da verilmiştir.

**Çizelge 11.** Kömür ayıklama tesisi ekserji bileşenleri [7].  
(Exergy components of coal extraction plant)

Kriplaj Tesisi	Miktar	$\psi^{CH}$ (kJ/kg) $\psi_{insan}$ (kJ/kişi)	$Ex_g$ (kJ)	$Ex_c$ (kJ)
Tüvenan kömür	6.215.002 ton	8680	$5,3957 \cdot 10^{13}$	
Ayıklanmış kömür	6.078.091 ton	8605	0	$5,2289 \cdot 10^{13}$
Atıl malzeme	136.911 ton	0	0	
Tesiste harcanan elektrik ekserjisi	2.557.290 kWh	-	$9,2 \cdot 10^9$	
İnsan kaynaklı ekserji	100 kişi	10.000	$2,8 \cdot 10^8$	
<b>Toplam</b>			<b><math>5,3966 \cdot 10^{13}</math></b>	<b><math>5,2289 \cdot 10^{13}</math></b>

**Çizelge 6.** Kömür çıkarma ve taşımadaki enerji bileşenleri [7]. (Coal extraction and transport energy components)

Kömür çıkarma ve taşıma	Miktar	AID (kJ/kg)	$E_g$ (kJ)	$E_c$ (kJ)
Kamyonlarda harcanan yakıt	1.859.709 lt	42.697,2	$6,59 \cdot 10^{10}$	$2,47 \cdot 10^{10}$
Hidrolik ekskavatörlerde harcanan yakıt	1.083.272 lt	42.697,2	$3,83 \cdot 10^{10}$	$1,40 \cdot 10^{10}$
Elektrikli ekskavatörlerde harcanan elektrik	917.278 kWh	-	$3,3 \cdot 10^9$	$2,64 \cdot 10^9$
<b>Toplam</b>			<b><math>10,75 \cdot 10^{10}</math></b>	<b><math>4,13 \cdot 10^{10}</math></b>



**Şekil 5.** Lavvar tesisi ekserji dağılımı. (Exergy distribution of coal washing.)

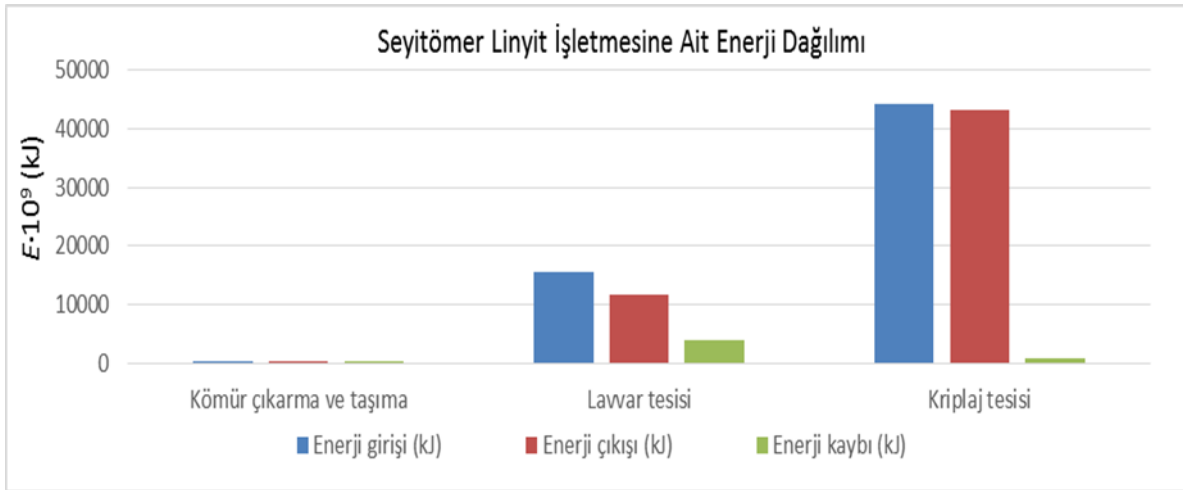
**Çizelge 10.** Kriplaj tesisi enerji bileşenleri [7]. (Energy components of coalbreaking)

Kriplaj Tesisi	Miktar	Orijinal birim	AID(kJ/kg) $e$ (kJ/kişi)	$E_g$ (kJ)	$E_c$ (kJ)
Tüvenan kömür	6.215.002	ton	7116	$4,4227 \cdot 10^{13}$	-
Ayıklanmış kömür	6.078.091	ton	7130	-	$4,3336 \cdot 10^{13}$
Atıl malzeme	136.911	ton	-	-	-
Tesiste harcanan elektrik enerjisi	2.557.290	kwh	-	$9,2 \cdot 10^9$	-
İnsan kaynaklı enerji	100	kişi	20.000	$5,6 \cdot 10^8$	-
<b>Toplam</b>				<b><math>4,4236 \cdot 10^{13}</math></b>	<b><math>4,3336 \cdot 10^{13}</math></b>

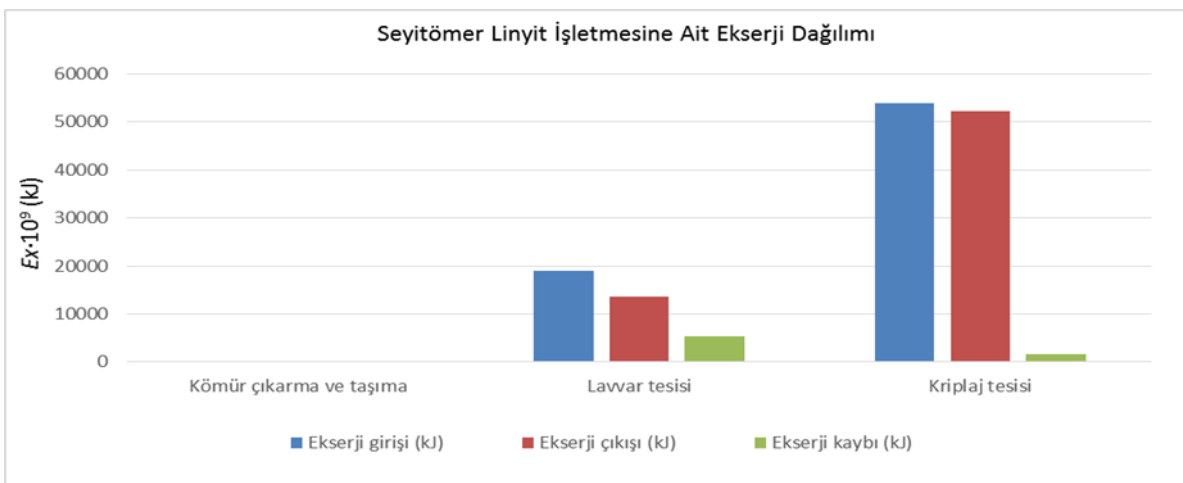


Şekil 7. Kriplaj tesisi enerji dağılımı. (Exergy distribution of coalbreaking.)

Kriplaj tesisinin ekserji verimi % 96,9 olarak ekserji giriş ve çıkış dağılımı grafikleri sırasıyla Şekil 8 ve 9'da verilmiştir.



Şekil 8. Linyit üretim prosesi enerji dağılımı. (Energy distribution of lignite production process.)



Şekil 9. Linyit üretim prosesi ekserji dağılımı. (Exergy distribution of lignite production process.)

Şekil 8 ve 9 incelendiğinde, en yüksek enerji kaybının ve ekserji yıkımının Lavvar tesisinde gerçekleştiği görülmüştür. Tüm işletme incelendiğinde ise düşük enerji ve ekserji verimi değerleri, kömür çıkarma ve taşıma prosesi için hesaplanmıştır. Seyitömer işletmesinin genel enerji verimi % 91,8 ve ekserji verimi % 90 olarak hesaplanmıştır.

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Seyitömer linyit işletmesi kömür üretim prosesi, kömür çıkarma ve taşıma, lavvar ve kriplaj olmak üzere başlıca 3 temel aşamadan oluşmaktadır. Bu üç aşama kendi içerisinde değerlendirildiğinde; kömür çıkarma ve taşıma aşaması enerji verimi % 38 ve ekserji verimi % 37 olarak, lavvar aşaması enerji verimi % 74,7 ve ekserji verimi % 71,8 olarak, kriplaj aşaması enerji verimi % 97,9 ve ekserji verimi % 96,9 olarak hesap edilmiştir.

Buna göre, kömür üretim prosesinde öncelikle ele alınması gereken aşama çıkarma ve taşıma aşamaları olup, bu aşamada temel elemanlar ekskavatör kamyonlardır. Seyitömer Linyit İşletmesinde kullanılan ekskavatörler, dizel motorlu olup, motor verimleri % 38-40 arasında değişirken, elektrik motorlu ekskavatörlerin verimleri %80 mertebesindedir. Ekskavatörlerde, dizel motor yerine, elektrikli motor kullanılması tercih edilmesi sistem verimini artıracaktır. Ayrıca, elektrik enerjisi birim maliyetinin akaryakıttan elde edilen enerjiye göre % 70 daha düşük olması, maliyet açısından da tasarruf sağlayacaktır.

Taşıma işleminde, 85 D Wabco kamyonlar kullanılmakta ve yapılan ölçümlerde enerji verimleri %37-38 olarak hesaplanmış, ancak ekserji veriminin % 8-9 arasında değiştiği belirlenmiştir. Bunun başlıca nedenleri; araçların eski model olmalarına bağlı aktarma organlarında güç kaybının fazla olması, kapasitelerinden daha düşük yükleme yapılması ve son olarak araçların çoğunda düşük verimli iki zamanlı motorların kullanılmasıdır. Araçların bazılarında deneme maksadıyla dört zamanlı Cummins KT 38 tipi 900 Hp motorlar adapte edilmiş, yapılan incelemede bunların %10 daha az yakıt tükettiği görülmüştür. Buna göre, dizel motor tip ve modelinin değiştirilip, yeni teknoloji motor adaptasyonu ve uygun kapasitede yükleme sağlanması sistem verimliliğini artıracaktır.

Lavvar tesisi enerji ve ekserji kaybının en fazla olduğu yerlerden ikinci aşamadır. Bu proses içerisindeki enerji kaybının en büyük nedeni ise enerjinin %90'lık bölümünün, yıkama sırasında toz kömürün de toprakla beraber atılmasıdır. Toz kömürü içeren şlamın ısı değerinin 2300-2500 kJ/kg olduğu dikkate alındığında, %25-30'luk kısmının toz kömür olduğu görülmektedir. Şlam içerisinde atılan toz kömürün tutulması ile bu enerjinin geri kazanımı sistem verimini artıracaktır.

Kriplaj prosesinde enerji kaybının yüzdesi düşüktür. Ancak, yıl içerisinde işlenen kömür miktarının yüksek olması enerji kaybını arttırmaktadır. Buradaki enerji kaybının iki nedeni; kömür kırıcı ve eleklerde kayıpların fazla olması, ve bu aşamada insan gücünden

faydalanılmasıdır. Eskimiş elek ve kırıcıların değiştirilmesi ve optimum insan gücünün kullanılması bu aşamadaki verimi artıracaktır. Önerilen tüm bu verim artırıcı düzenlemelerin ekonomik olarak da değerlendirilmesi yapılmalı, uygun görüldüğü takdirde yatırım planları oluşturulup bir an evvel hayata geçirilmelidir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Komur>, “Kömür Enerji” , (2016).
- [2] <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Dogal-Gaz>, “Doğalgaz Enerji”, (2016).
- [3] Küçükbayrak, S., Basmacı, F. and Kadioğlu E., “Çayırhan, linyitinin kükürdünün hava oksidasyonu ile giderilmesi”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 9(3): (1986).
- [4] Akalın, M., Küçükbayrak, S. and Kadioğlu E., “Çayırhan linyitinin kükürdünün CO<sub>2</sub> ortamında yapılan karbonizasyonla giderilmesi”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 9(4): (1986).
- [5] Rosen, M.A. and Dincer, I., “Exergy analysis of waste emissions”, *International Journal of Energy Research.*, 23: 1153-1163, (1999).
- [6] Lobachyov, V. K. and Ritcher, H.J., “High efficiency coal-fired power plant of the future”, *Energy Conversion and Management*, 38: 1693-1699, (1996).
- [7] Saraydar, M., “Seyitömer Linyit İşletmesi Birinci ve İkinci Yasa Çözümlemesi”, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, (2011).
- [8] Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., “*Thermal Design And Optimization*”, John Wiley & Sons Inc., 542, (1996).
- [9] Ahrendts, J., “Reference states”, *Energy*, 5: 667-677, (1980).
- [10] Gholamian, E., Mahmoudi, S.M.S. and Zare, V., “Proposal, exergy analysis and optimization of a new biomass-based cogeneration system”, *Applied Thermal Engineering* 93: 223-235, (2016).
- [11] Seyitoglu, S.S., Dincer, I. and Kilicarslan, A., “Energy and exergy analyses of hydrogen production by coal gasification”, *International Journal of Hydrogen Energy*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.228>, (2016).
- [12] Kotas, T.J., “*The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*”, Krieger Publishing Company: Malabar, FL, (1995).
- [13] Sayın, C., Hosoz, M., Canakci, M. and Kilicaslan, I., “Energy and exergy analyses of a gasoline engine”, *International Journal of Energy Research* 31(3): 259-273, (2007).
- [14] [http://www.eie.gov.tr/duyurular\\_haberler/document/SEN\\_VER\\_15\\_Usul\\_ve\\_Esaslar\\_Ek2.pdf](http://www.eie.gov.tr/duyurular_haberler/document/SEN_VER_15_Usul_ve_Esaslar_Ek2.pdf), Enerji Kaynaklarının Alt Isıl Değerleri ve Petrol Eşdeğerine Çevrim Katsayıları, (2016).
- [15] Hepbaşlı, A., “A study on estimating the energetic and exergetic prices of various residential energy sources”, *Energy and Buildings*, 40(3): 308–315, (2008).
- [16] Çalışkan, H., Hepbaşlı, A., 2010, “Energy and exergy prices of various energy sources along with their CO<sub>2</sub> equivalents”, *Energy Policy*, 38(7): 3468-3481, (2010).
- [17] Beyhan, Y., “İşçi Sağlığı - İş Güvenliği Ve Beslenme”, Sağlık Bakanlığı Yayınları, Yayın no: 726, Ankara, (2008).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

## İki malzemeli kompozit bir kirişin serbest ve zorlanmış titreşimlerinin incelenmesi

### *Investigation on free and forced vibration of a bi-material composite beam*

Yazar(lar) (Author(s)): Şeref Doğuşcan AKBAŞ

ORCID: 0000-0001-5327-3406

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Akbaş Ş. D., “İki malzemeli kompozit bir kirişin serbest ve zorlanmış titreşimlerinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 65-73, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.386841



# İki Malzemeli Kompozit Bir Kirişin Serbest ve Zorlanmış Titreşimlerinin İncelenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Şeref Doğuşcan AKBAS\***

Doğa Bilimleri ve Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 22.12.2016 ; Kabul/Accepted : 21.03.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada, iki malzemeli kompozit basit mesnetli bir kirişin serbest ve zorlanmış titreşimi dış basınç yükü etkisi altında araştırılmıştır. Ele alınan kompozit kirişin çözümünde, düzlem parçalı sürekli ortam modeli ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Söz konusu problemin yönetici denklemleri, Hamilton prensibi ile elde edilmiştir. İki malzemeli kirişin boyutları, levha modeli olacak biçimde seçilerek düzlem gerilme problemi uygulanmıştır. Ele alınan çalışmada, farklı malzeme sabit oranları ile dağılımlarının, kirişin serbest ve zorlanmış titreşim cevaplarına olan etkileri araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** İki malzemeli kompozit kiriş, sonlu elemanlar yöntemi, serbest titreşim, zorlanmış titreşim.

## Investigation on Free and Forced Vibration of a Bi-Material Composite Beam

### ABSTRACT

In this study, free and forced vibration of a bi-material composite beam subjected to external pressure load is investigated. In the solution of the composite beam, plane piecewise solid continua model and finite element method is used. The governing equations of the problems are obtained by using the Hamilton procedure. With the dimensions of the bi-material beam are assumed as plane model, the plane stress problem is implemented. In the study, the effects of the different material constant ratios and distributions on the free and forced vibration responses are investigated.

**Keywords:** Bi-Material composite beam, finite element method, free vibration, forced vibration

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bilindiği gibi kompozit malzemeler, iki yada daha fazla farklı malzemelerin üstün özelliklerini birleştirerek daha dayanıklı bir malzeme oluşturulması amacıyla üretilen malzemelerdir. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte, kompozit malzemeler gün geçtikçe uygulama alanı artmaktadır. En bilinen kompozit yapı türlerinden biri olan iki malzemeli kompozit yapılarda, bir malzeme sıcaklık, korozyon gibi dış etkilere karşı dayanım sağlarken, diğer malzeme ise mekanik yüklere karşı dayanım sağlamaktadır. Örnek olarak, çelik/seramik karışımı kompozit malzemede, mekanik yüklerden ortaya çıkan gerilmeleri çelik ile dayanım sağlarken, sıcaklık ve korozyon gibi etkileri ise seramik malzemesi dayanım sağlamaktadır. İki malzemeli kompozit kirişler ile yapılan çalışmalar incelendiğinde; Doyle [1] iki boyutlu iki malzemeli yapının dinamik cevaplarını incelemiştir. Shu ve Fan [2] parçalı ve iki malzemeli bir kirişin dinamik analizini incelemiştir. Shu ve MSRao [3] delaminasyonlu iki malzemeli bir kirişin burkulma analizini araştırmışlardır. Her ve Su [4] iki malzemeli, iç çatlaklı bir kirişin şekil değiştirme enerjisi salıverme oranını araştırmışlardır.

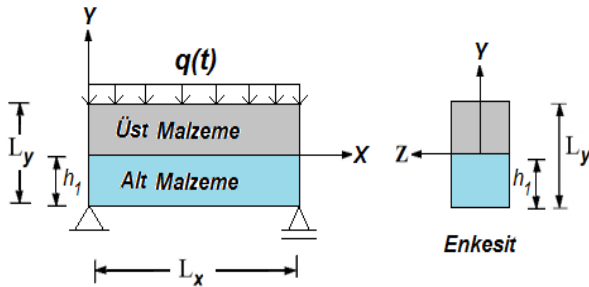
Yu vd. [5] epoksi/çelik malzemelerinden yapılmış iki malzemeli bir kirişin artık gerilmelerini deneysel olarak incelemiştir. Zhang ve Paulino [6] fonksiyonel derecelendirilmiş ve iki malzemeli kirişlerin dinamik ve dalga yayılımlarını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir. Della ve Shu [7] delaminasyonlu iki malzemeli bir kirişin serbest titreşim analizini araştırmışlardır. Srinivasan ve Spearing [8] iki malzemeli piezoelektrik mikro aktüatörlerin optimum malzeme seçimlerine dair çalışmışlardır. Batra vd. [9] iki malzemeli çubukların serbest ve zorlanmış titreşimlerini ağırsız lokal Petrov-Galerkin yöntemi ile çözmüşlerdir. Eren [10,11] İki malzemeli konsol kirişin büyük yer değiştirmesini incelemiştir. Wu [12] iki malzemeli kirişlerin manyetik ile termal yükler altında titreşim davranışlarını incelemiştir. Lin vd. [13] SiN<sub>x</sub>/Al malzemelerinden oluşmuş iki malzemeli konsol bir mikro yapının termo-mekanik davranışlarını araştırmışlardır. Carlberger and Stigh [14] iki malzemeli kirişlerin dinamik test ve simülasyonlarını yapmışlardır. Ivanova vd. [15] dinamik yükler altındaki iki malzemeli bir plağın dinamik davranışları incelenmiştir. Wang ve Liu [16] iki malzemeli, ortasından tabakalandırılmış bir kirişin analitik çözümünü araştırmıştır. Her vd. [17] iki malzemeli tabakalı bir yapının termal gerilme analizini yapmışlardır. Petrova ve Schmauder [18] çatlak içeren fonksiyonel derecelendirilmiş, homojen ve iki malzemeli

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : serefda@yahoo.com

sistemlerin termal kırılma analizlerini incelemişlerdir. Voicu vd. [19] iki malzemeli konsol bir kirişte, boyut etkisinin gerilmeler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Akbaş [20,21,22,23,24,25,26,27], Kocatürk ve Akbaş [28,29,30], Akbaş ve Kocatürk [31,32,33], Kocatürk vd. [34] fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit kirişler ile düzlem kirişlerin titreşim ve burkulma sonrası davranışlarını araştırmıştır. Suhir ve Nicolics [35] iki malzemeli konsol bir kirişin eğilme davranışlarını incelemişlerdir. Wu [36] iki malzemeli, manyetik-elastik özellikli konsol bir kirişin doğrusal olmayan titreşim analizini yapmıştır. Liu ve Shu [37] elastik zemine oturan delaminasyonlu iki malzemeli kirişlerin titreşim davranışlarını analitik olarak çözmüşlerdir. Petrova ve Schmauder [38] çatlak içeren fonksiyonel derecelendirilmiş, homojen ve iki malzemeli sistemlerin termo-mekanik yükler etkisi altında kırılma davranışlarını incelemişlerdir. Chama vd. [39] termo-mekanik yükler etkisi altında iki malzemeli kirişlerin çatlak ilerlemesini incelemişlerdir. Li vd. [40] iki malzemeli mikro kirişlerin modifiye edilmiş kuvvet çifti gerilmesi teorisi serbest titreşim cevaplarını incelemiştir. Ele alınan çalışmada iki malzemeli kompozit basit mesnetli bir kirişin dinamik davranışları, serbest ve zorlanmış titreşim halleri ile incelenmiştir. Ele alınan kompozit kiriş elamanı, levha olarak modellenmiş olup, düzlem parçalı sürekli ortam modeli kullanılmıştır. Probleme ait yönetici denklemleri, Hamilton prensibi ile elde edilmiş olup, problemin çözümünde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Farklı malzeme sabit oranları ile dağılımlarına göre, serbest ve zorlanmış titreşim cevapları elde edilmiştir.

## 2. PROBLEMİN FORMÜLASYONU (FORMULATION AND SOLUTION OF THE PROBLEM)

Düzgün yayılı dinamik yük etkisi altında  $q(t)$ , iki malzemeli kompozit malzemeden yapılmış basit mesnetli bir kiriş,  $X, Y, Z$  koordinat takımı ile birlikte şekil 1'de gösterilmiştir. Kirişin yatay ve düşey uzunlukları sırasıyla  $L_x, L_y$ , kalınlığı ise  $t_z$ , alt malzemenin tabandan yüksekliği  $h_1$  ile gösterilmiştir. Kirişin geometrik sınır şartlarında, sol alt ucu sabit mesnetli, sağ alt ucu ise kayıcı mesnetli olarak alınmıştır.



Şekil 1. Düzgün yayılı dinamik yük etkisi altında, iki malzemeli basit mesnetli bir kiriş ( A simple Supported Bi-Material Beam Under Uniform Dynamic Load).

Probleme ait şekil değiştirme- yer değiştirme ilişkisi izleyen şekilde verilmiştir:

$$\varepsilon_{XX} = \frac{\partial u}{\partial X}, \quad \varepsilon_{YY} = \frac{\partial v}{\partial Y}, \quad 2\varepsilon_{XY} = \frac{\partial u}{\partial Y} + \frac{\partial v}{\partial X} \quad (1)$$

Burada  $\varepsilon_{XX}, \varepsilon_{YY}$  sırasıyla  $X$  ve  $Y$  doğrultularındaki eksenel şekil değiştirmeleri,  $\varepsilon_{XY}$  ise açılmal şekil değiştirmeyi göstermektedir. Şekil değiştirme ile yer değiştirme arasındaki bağıntı, matris formda aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{XX} \\ \varepsilon_{YY} \\ 2\varepsilon_{XY} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial X} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial Y} \\ \frac{\partial}{\partial Y} & \frac{\partial}{\partial X} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2a)$$

$$\{\varepsilon\} = [D]\{d\} \quad (2b)$$

Burada  $[D]$  şekil değiştirme ile yer değiştirmeler arasındaki diferansiyel operatör,  $\{d\}$  ise yer değiştirme vektörüdür. Probleme ait bünye denklemleri izleyen şekilde verilmiştir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{XX} \\ \sigma_{YY} \\ \sigma_{XY} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{XX} \\ \varepsilon_{YY} \\ 2\varepsilon_{XY} \end{Bmatrix} \quad (3a)$$

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \quad (3b)$$

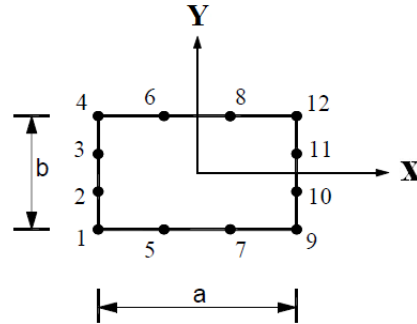
Burada  $[C]$  malzeme bünye tansörü,  $C_{11}, C_{12}, C_{22}, C_{66}$  indirgenmiş bünye tansör birleşenleri olup, değerleri düzlem gerilme hali için izleyen ifadelerde verilmiştir:

$$C_{11} = C_{22} = \frac{E}{1-\nu^2}, \quad C_{12} = C_{21} = \nu \frac{E}{1-\nu^2}, \quad C_{66} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

Burada  $E$  Elastisite modülü,  $\nu$  ise Poisson oranıdır. Probleme ait yönetici denklemlerinin elde edilmesinde Hamilton prensibinden yararlanılmıştır. Dinamik etkileri göz önüne alınarak, düzlem parçalı sürekli ortam modeli için virtüel iş izleyen şekilde verilmiştir:

$$t_z \int_A (\sigma_{XX} \delta \varepsilon_{XX} + 2\sigma_{XY} \delta \varepsilon_{XY} + \sigma_{YY} \delta \varepsilon_{YY} + \rho \dot{u} \delta u + \rho \dot{v} \delta v) dA - t_z \int_S (r_X \delta u + r_Y \delta v) dS - t_z \int_A (k_X \delta u + k_Y \delta v) dA = 0 \quad (5)$$

Burada  $r_X$  ve  $r_Y$  yüzey kuvvetleri,  $\rho$  kütle yoğunluğu,  $k_X$  ve  $k_Y$  sırasıyla  $X$  ve  $Y$  doğrultularındaki birim hacmin kütle kuvvetleridir. (5) eşitliğindeki  $\dot{u}, \dot{v}$  ifadeleri, zamana göre ikinci türevi göstermektedir. Probleme ait sonlu elemanlar çözümü için, 12 düğüm noktalı dikkörtgen sonlu eleman kullanılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. 12 düğüm noktalı dikkörtgen, iki boyutlu eleman (A twelve-node quadratic plane element).

Şekil 2 de  $a$  ve  $b$  sırasıyla sonlu elemanın yatay ve düşey uzunluklarını göstermektedir. Sonlu elemanın yer değiştirme alanları, düğüm yer değiştirmeleri cinsinden izleyen şekilde ifade edilir:

$$\{d\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = [\emptyset]\{d_n\} \quad (6a)$$

$$[\emptyset] = [\emptyset_1 \ \emptyset_2 \ \dots \ \emptyset_{12}] \quad (6b)$$

$$\{d_n\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{12} \\ v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{12} \end{Bmatrix} \quad (6c)$$

$$u = (u_1\emptyset_1 + u_2\emptyset_2 + u_3\emptyset_3 + u_4\emptyset_4 + u_5\emptyset_5 + u_6\emptyset_6 + u_7\emptyset_7 + u_8\emptyset_8 + u_9\emptyset_9 + u_{10}\emptyset_{10} + u_{11}\emptyset_{11} + u_{12}\emptyset_{12}) \quad (6d)$$

$$v = (v_1\emptyset_1 + v_2\emptyset_2 + v_3\emptyset_3 + v_4\emptyset_4 + v_5\emptyset_5 + v_6\emptyset_6 + v_7\emptyset_7 + v_8\emptyset_8 + v_9\emptyset_9 + v_{10}\emptyset_{10} + v_{11}\emptyset_{11} + v_{12}\emptyset_{12}) \quad (6e)$$

Burada  $u_i$  ve  $v_i$  düğüm noktalarının sırasıyla, yatay ile düşey yer değiştirmeleridir.  $\{d_n\}$  düğüm noktalarına ait yer değiştirme vektörü olup, birleşenleri  $u_i$  ve  $v_i$  dir. Eşitlik (6)'de  $\emptyset_i$ , şekil fonksiyonlarını göstermektedir. 12 düğüm noktalı dikdörtgen sonlu elemana ait şekil fonksiyonları izleyen şekilde ifade verilmiştir:

$$\emptyset_1 = \frac{1}{32} \left(1 - \frac{2X}{a}\right) \left(1 - \frac{2Y}{b}\right) \left(-10 + 9 \left(\frac{4X^2}{a^2} + \frac{4Y^2}{b^2}\right)\right),$$

$$\emptyset_2 = \frac{9}{32} \left(1 - \frac{2X}{a}\right) \left(1 - \frac{4Y^2}{b^2}\right) \left(1 - \frac{6Y}{b}\right)$$

$$\emptyset_3 = \frac{9}{32} \left(1 - \frac{2X}{a}\right) \left(1 - \frac{4Y^2}{b^2}\right) \left(1 + \frac{6Y}{b}\right),$$

$$\emptyset_4 = \frac{1}{32} \left(1 - \frac{2X}{a}\right) \left(1 + \frac{2Y}{b}\right) \left(-10 + 9 \left(\frac{4X^2}{a^2} + \frac{4Y^2}{b^2}\right)\right)$$

$$\emptyset_5 = \frac{9}{32} \left(1 - \frac{2Y}{b}\right) \left(1 - \frac{4X^2}{a^2}\right) \left(1 - \frac{6X}{a}\right),$$

$$\emptyset_6 = \frac{9}{32} \left(1 + \frac{2Y}{b}\right) \left(1 - \frac{4X^2}{a^2}\right) \left(1 - \frac{6X}{a}\right)$$

$$\emptyset_7 = \frac{9}{32} \left(1 - \frac{2Y}{b}\right) \left(1 - \frac{4X^2}{a^2}\right) \left(1 + \frac{6X}{a}\right),$$

$$\emptyset_8 = \frac{9}{32} \left(1 + \frac{2Y}{b}\right) \left(1 - \frac{4X^2}{a^2}\right) \left(1 + \frac{6X}{a}\right)$$

$$\emptyset_9 = \frac{1}{32} \left(1 + \frac{2X}{a}\right) \left(1 - \frac{2Y}{b}\right) \left(-10 + 9 \left(\frac{4X^2}{a^2} + \frac{4Y^2}{b^2}\right)\right),$$

$$\emptyset_{10} = \frac{9}{32} \left(1 + \frac{2X}{a}\right) \left(1 - \frac{4Y^2}{b^2}\right) \left(1 - \frac{6Y}{b}\right)$$

$$\emptyset_{11} = \frac{9}{32} \left(1 + \frac{2X}{a}\right) \left(1 - \frac{4Y^2}{b^2}\right) \left(1 + \frac{6Y}{b}\right),$$

$$\emptyset_{12} = \frac{1}{32} \left(1 + \frac{2X}{a}\right) \left(1 + \frac{2Y}{b}\right) \left(-10 + 9 \left(\frac{4X^2}{a^2} + \frac{4Y^2}{b^2}\right)\right) \quad (7)$$

(2) ile (6) eşitlikleri, (3) eşitliğinde yerlerine yazılırsa bünye bağıntısı izleyen şekilde olur:

$$\{\sigma\} = [C][D][\emptyset]\{d_n\} = [C][B]\{d_n\} \quad (8)$$

(8) eşitliğinde  $[B]$  ifadesi,  $[B] = [D][\emptyset]$  olarak tanımlanmıştır. Virtüel yer değiştirme ile şekil değiştirmelerin matris formları izleyen şekilde verilmiştir:

$$\{\delta d\} = [\emptyset]\{\delta d_n\}, \{\delta \ddot{d}\} = [\emptyset]\{\delta \ddot{d}_n\}, \{\delta \varepsilon\} = [B]\{\delta d\} \quad (9)$$

(8) ve (9) eşitlikleri virtüel iş eşitliğine yerine yazıldığında, izleyen ifade elde edilir:

$$t_z \int_A \{\delta d_n\}^T ([B]^T [C][B]\{d_n\} + \rho(Y)[\emptyset]^T [\emptyset]\{\delta \ddot{d}\}) dA - t_z \int_S \{\delta d_n\}^T [\emptyset]^T \begin{Bmatrix} r_X \\ r_Y \end{Bmatrix} dS - t_z \int_A \{\delta d_n\}^T [\emptyset]^T \begin{Bmatrix} k_X \\ k_Y \end{Bmatrix} dA = 0 \quad (10a)$$

$$\{\delta d_n\}^T ([K]\{d_n\} + [M]\{\ddot{d}\} - \{r\} - \{s\}) = 0 \quad (10b)$$

(10b) eşitliğinde gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra, probleme ait sonlu elemanlar hareket denklemi izleyen şekilde elde edilir:

$$[K]\{d_n\} + [M]\{\ddot{d}_n\} = \{F\} \quad (11)$$

Burada  $[K]$  rijitlik matrisi,  $[M]$  kütle matrisi,  $\{F\}$  yük vektörü,  $\{d_n\}$  yer değiştirme vektörü,  $\{\ddot{d}_n\}$  ivme vektörü,  $\{s\}$  düğüm noktalarına indirgenmiş kütle kuvvetleri vektörü,  $\{r\}$  düğüm noktalarına indirgenmiş dış yükler vektörüdür. Sonlu elemanlar hareket denklemini oluşturan matris ve vektörlerin detayları izleyen şekilde ifade verilmiştir:

$$[K] = t_z \int_A [B]^T [C][B] dA \quad (12a)$$

$$[M] = t_z \int_A \rho(Y)[\emptyset]^T [\emptyset] dA \quad (12b)$$

$$\{F\} = \{r\} + \{s\} \quad (12c)$$

$$\{r\} = \int_S [\emptyset]^T \begin{Bmatrix} r_X \\ r_Y \end{Bmatrix} dS \quad (12d)$$

$$\{s\} = \int_A [\emptyset]^T \begin{Bmatrix} k_X \\ k_Y \end{Bmatrix} dA \quad (12e)$$

(11) eşitliğinde verilen eleman rijitlik matrisi, kütle matrisi ve yük vektörü, bilinen sonlu elemanlar birleştirme işlemleri sonucu ile sistem rijitlik matrisi, kütle matrisi ve yük vektörü elde edilir. Bu matris ve vektörlerin boyutları, sistemin serbestlik derecesi kadar olur. Kirişin elemanın iki malzemeli olması durumunda hesaplanacak sonlu eleman matris ve vektörleri, malzemelerin konumlarına bağlı olarak her bir sonlu elemanın o malzeme sabitleri değerleri ile hesap edilip, bilinen sonlu elemanlar birleştirme yöntemleri ile elde edilir. Ele alınan problem iki boyutlu dikdörtgen sonlu elemanlar modeli ile çözüldüğünden dolayı, her bir dikdörtgen sonlu elemana hangi malzemenin yer aldığı malzeme dağılım oranından tespit edilip, her bir sonlu

elemana düşen malzeme sabitleri değerleri ile eşitlik 12'de verilen matris ve vektörlerin hesap işlemleri yapılır.

Zorlanmış titreşim probleminde, zorlayıcı yük;

$$q(t) = q_0 \sin(\bar{w}t) \quad (13)$$

harmonik bir fonksiyon biçimde seçilmiştir. Burada  $q_0$  zorlayıcı yükün genliği, Zorlanmış titreşim çözümü için, zorlayıcı yükün özelliğine göre yer değiştirme vektörü izleyen formda seçilmiştir;

$$\{d_n\} = \{d_m\} \sin(\bar{w}t) \quad (14)$$

burada  $\{d_m\}$  yer değiştirmenin genliğidir. (14) eşitliği, (11) eşitliğinde yerine yazılırsa, zorlanmış titreşim için sonlu elemanlar hareket denklemi izleyen şekilde olur:

$$\{d_m\}([K] - \bar{w}^2[M]) = \{F\} \quad (15)$$

Serbest titreşim problemi için ise, (11) eşitliğin sağ tarafındaki yük vektörü sıfır alınarak elde edilen denklem ile çözüme ulaşılır. Bu durumda elde edilen denklem ile özdeğer problemi oluşmaktadır:

$$[K]\{d_n\} + [M]\{\dot{d}_n\} = 0 \quad (16a)$$

$$([K] - w^2[M])\{\hat{d}_n\} = 0 \quad (16b)$$

Burada  $w$  sistemin doğal açısal frekansı,  $\{\hat{d}_n\}$  ise mod vektörüdür. Elde edilen sonlu elemanlar denklemlerinin integrasyon hesaplarında, beş noktalı Gauss integral kuralı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar denklemlerinin çözümü, sayısal ve grafik sonuçların elde edilmesinde, MATLAB programında algoritma ve program yazılmıştır. MATLAB'da yazılan programın algoritması eklerde verilmiştir.

Sayısal işlemlerde kullanılan boyutsuz ifadeler izleyen şekilde verilmiştir:

$$P_R = \frac{P_A}{P_U} \quad (17a)$$

$$h_o = \frac{h_1}{L_Y} \quad (17b)$$

Burada  $P_R$  malzeme sabit oranı olup, alt malzeme sabitleri değerinin ( $P_A$ ) üst malzeme sabitleri değerine ( $P_U$ ) oranıdır.  $h_o$  ise malzeme dağılım oranı olup, alt malzeme yüksekliğinin ( $h_1$ ) kiriş yüksekliğine ( $L_Y$ ) oranıdır.

### 3. SAYISAL SONUÇLAR (NUMERICAL RESULTS)

Sayısal hesaplarda, farklı malzeme oranları ile malzeme dağılımlarına göre, iki malzemeli kompozit basit bir kirişin serbest ve zorlanmış titreşim cevapları incelenmiştir. İki malzemeli yapı için, kirişin alt malzeme özellikleri;  $E=70 \text{ GPa}$ ,  $\nu=0.33$ ,  $\rho=1200 \text{ kg/m}^3$  alınmış olup, üst kısmı ise eşitlik (17a) a göre farklı malzeme sabit oranlarına göre alt malzeme sabitleri değerlerinin katları olarak belirlenmiştir. Kirişin üst malzeme sabitleri değerleri (Young Modülü, Poisson oranı), alt malzeme sabitleri değerlerinin  $1/P_R$  katı olacak

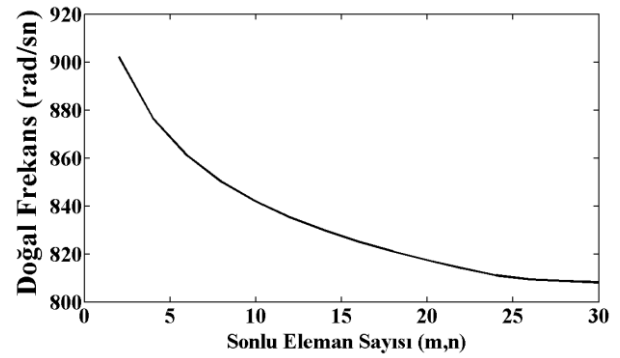
şekilde alınmıştır. İncelenen problemde, kiriş boyutları  $L_X=4 \text{ m}$ ,  $L_Y=1 \text{ m}$ ,  $t_Z=0.1 \text{ m}$  seçilmiştir.

Sonlu elemanlar formülasyonlarının çözümünde, kirişin geometrik sınır koşulları, sol alt ucu sabit mesnetli ile sağ alt ucu ise kayıcı mesnetli olduğundan dolayı, yer değiştirme vektörünün mesnet noktalarına karşılık gelen değerleri sıfır alınır:

$$u_1 = v_1 = 0, \quad X = 0, \quad Y = -0.5 L_Y \quad (18a)$$

$$v_9 = 0, \quad X = L_X, \quad Y = -0.5 L_Y \quad (18b)$$

Sayısal hesaplamalarda sonlu eleman sayısını belirleyebilmek için serbest titreşim sonuçları üzerine yakınsama çalışması yapılmıştır. Şekil 3'de  $P_R=2$  (üst kısmın malzeme sabitleri değerleri, alt kısım malzeme sabitleri değerlerinin yarısı kadardır.),  $h_o=0.5$  (iki malzemenin yükseklikleri eşittir.) değerleri için iki malzemeli kompozit basit kirişin doğal frekansları, değişik sonlu eleman sayılarına göre hesaplanmış ve gösterilmiştir. Şekil 3'deki yakınsama grafiklerinde, yatay sonlu eleman  $m$ , düşey sonlu eleman  $n$  ile gösterilmiştir. Sonlu eleman sayısı belirlenirken yatay ve düşey sonlu elemanlar eşit alınmıştır ( $m=n$ ).



Şekil 3. Sonlu eleman sayısı için yakınsama çalışması (The Convergence Study for the number of the Finite Element).

Şekil 3'de görülmektedir ki, hem yatay hem de düşey sonlu eleman sayıları ( $m,n$ ) 24 değerine ulaştıktan sonra, doğal frekans değerleri yakınsamaktadır. Yakınsama çalışması sonucunda, sayısal hesaplarda sonlu eleman sayıları  $m=n=24$  alınmıştır.

Elde edilen formülasyonların ve Matlab program dilinde yazılan bilgisayar programının doğruluğunu test etmek amacıyla, ele alınan problem ANSYS Workbench 14.0 [41] sonlu elemanlar paket modellenmiştir. Probleme ait bazı sonuçlar, ANSYS Workbench paket programından elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalar yapılmıştır. Problemin ANSYS Workbench programındaki çözümünde, üç boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır. Çizelge 1'de elde farklı  $P_R$  ile  $h_o$  değerleri için elde edilen frekanslar, ANSYS Workbench paket programında elde edilen frekans değerleri ile karşılaştırılmıştır.

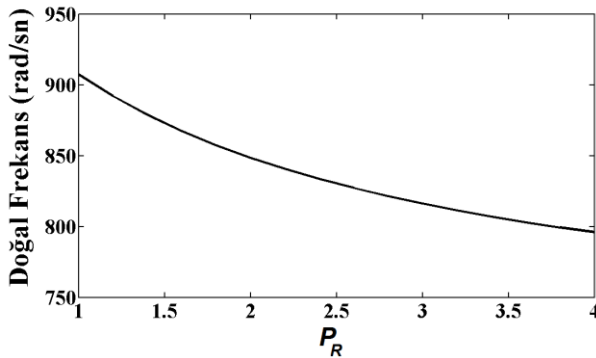
Çizelge 1. Karşılaştırma çalışması (Comparison study)

$h_o$	$P_R=3$		$P_R=5$	
	Sunulan	ANSYS	Sunulan	ANSYS
0.5	122.16 Hz	121.81 Hz	109.16	108.67
0.25	116.75 Hz	115.42 Hz	103.10	102.32

Çizelge 1 den görüldüğü gibi, elde edilen sonuçlar ANSYS Workbench programından elde edilen sonuçlara yakın çıkmıştır.

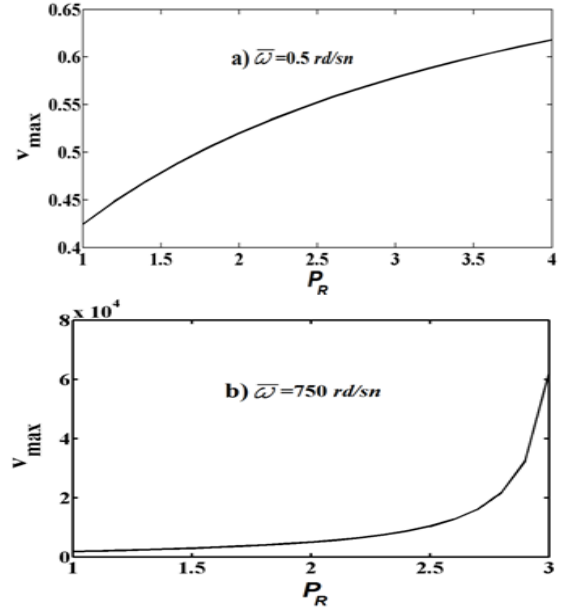
### 3.1. Malzeme Sabit Oranının Etkisi ( $P_R$ ) (The Effect of the Material Constant Ratio ( $P_R$ ))

Bu bölümde, farklı malzeme dağılımlarının, yani farklı malzeme sabit oranlarının ( $P_R$ ) kirişin serbest ile zorlanmış titreşim cevapları üzerindeki etkileri sunulmuştur. Farklı Malzeme sabit oranlarının kirişin doğal frekanslarına olan etkisi şekil 4'de, zorlanmış dinamik yükleme altında oluşan maksimum düşey yer değiştirmeye ( $v_{max}$ ) etkisi de şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 4 ve 5 deki grafiklerde malzeme dağılım oranı sabit olup  $h_o=0.4$  alınmıştır. Şekil 5 de verilen zorlanmış titreşim grafiğinde, zorlayıcı kuvvetin frekansları  $\bar{\omega}=0.5 \text{ rad/sn}$  ile  $\bar{\omega}=750 \text{ rad/sn}$  alınmıştır. Şekil 5 deki yük frekans değerleri, elemanın doğal frekansına uzak ve yakın değerler olup, rezonans durumuna uzak ve yakın durumlardaki dinamik etkilerin  $P_R$  oranı ile nasıl değiştiğini görmek amacıyla farklı alınmıştır. Maksimum düşey yer değiştirme hesabında, yükün genlik değerine ulaştığı andaki, kirişin orta noktasının düşey yer değiştirmesi dikkate alınmıştır.



Şekil 4. Malzeme sabit oranı ile doğal frekans arasındaki ilişki (The relationship between the material constant ratio and fundamental frequency).

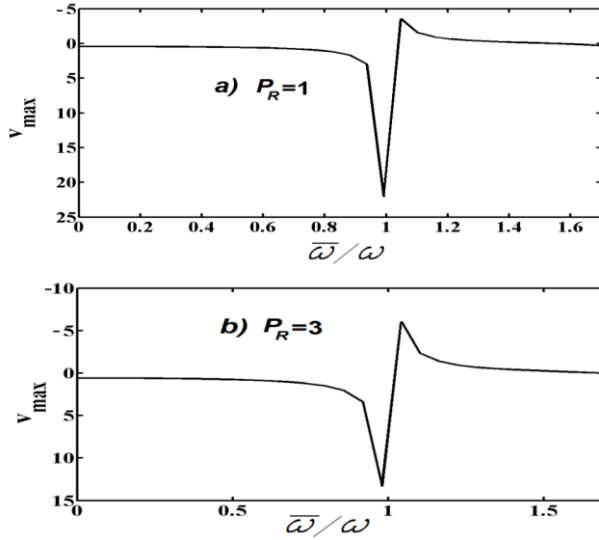
Şekil 4 ve 5'den görülmektedir ki, malzeme sabit oranı ( $P_R$ ) değeri arttıkça doğal frekanslar azalmakta ve yer değiştirmeler ise artmaktadır. Çünkü malzeme sabit oranının artması ile birlikte, alt malzeme sabitleri değeri sabitken üst malzeme sabitleri değerleri düştüğünden dolayı kirişin rijitliği azalmakta, doğal olarak da doğal frekans değerinde azalma ve yer değiştirmeler de artma



Şekil 5. Malzeme sabit oranı ile maksimum düşey yer değiştirme arasındaki ilişki a)  $\bar{\omega}=0.5 \text{ rad/sn}$  b)  $\bar{\omega}=750 \text{ rad/sn}$  (The relationship between the material constant ratio and maximum vertical displacement a)  $\bar{\omega}=0.5 \text{ rad/sn}$  b)  $\bar{\omega}=750 \text{ rad/sn}$ ).

oluşmaktadır. Şekil 5a da, zorlayıcı yükün frekansı yapının doğal frekansından uzak olması (rezonans durumundan uzak) durumunda yer değiştirmeler  $P_R$  değerinin artmasıyla birlikte monoton bir biçimde artmaktadır. Şekil 5b de zorlayıcı yükün frekansı yapının doğal frekansından yakın olması (rezonans durumundan yakın) durumu için verilen grafikte,  $P_R$  değerinin artmasıyla yer değiştirmeler daha hızlı bir biçimde artmakta ve belli bir  $P_R$  değerinden sonra düşey asimptota yaklaşım sonsuza doğru gitmektedir.

Şekil 6'da malzeme sabit oranının zorlanmış titreşim'e olan etkisi gösterilmiştir. Şekilde, maksimum düşey yer değiştirme ile frekans oranı ( $\bar{\omega}/\omega$ ) arasındaki ilişki, farklı malzeme sabit oranlarına göre,  $h_o=0.4$  ve  $q_0=0.5 \text{ GPa}$  için gösterilmiştir. Buradaki frekans oranı ( $\bar{\omega}/\omega$ ), zorlayıcı yükün frekansı ile kirişin doğal frekansının oranıdır.

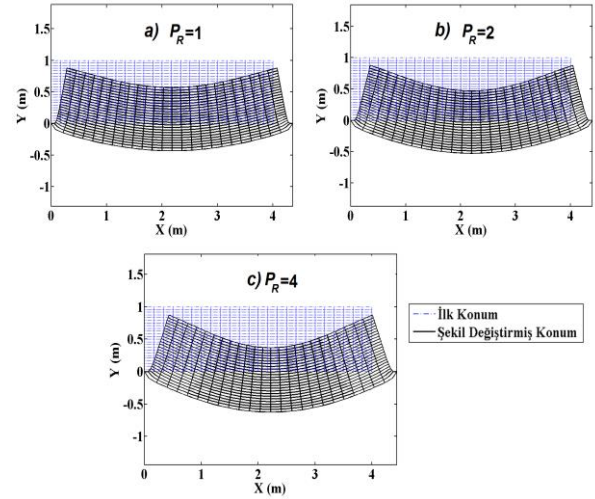


**Şekil 6.** Farklı sabit malzeme oranlarına göre maksimum düşey yer değiştirme ile frekans oranı arasındaki ilişki, a)  $P_R=1$ , b)  $P_R=3$ . (The relationship between the maximum vertical displacement and frequency ratio for different material constant ratio, a)  $P_R=1$ , b)  $P_R=3$ ).

Şekil 6 görüldüğü üzere, frekans oranı 1 değerine yaklaştığında, yani zorlayıcı yükün frekans değeri kirişin doğal frekans değerine yaklaştığında, yer değiştirmeler ciddi biçimde büyümekte ve rezonans durumu ortaya çıkmaktadır. Şekil 6 görülmektedir ki, malzeme sabit oranının artması ile birlikte yer değiştirmeler de artmaktadır.

Malzeme sabit oranının dinamik yer değiştirmeler üzerindeki etkisini daha net görebilmek amacıyla, farklı  $P_R$  değerlerine göre kirişin yer değiştirmiş konumları  $h_o=0.4$ ,  $q_o=0.5$  GPa ve  $\bar{\omega}=0.5$  rd/sn için şekil 7'de gösterilmiştir. Buradaki şekil değiştirmiş konumlar ve diğer şekiller, MATLAB' da algoritma ve program yazılarak elde edilmiştir. Şekil 7'deki konumlar, yükün genlik değerine ulaştığı andaki konumlardır.

Şekil 7'de, kirişin konumları sonlu eleman üzerinde gösterilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü üzere,  $P_R$  değerinin yer değiştirmelerin genliği üzerine önemli etkisi olduğu daha net görülmektedir.  $P_R$  oranı büyüdükçe, yer değiştirmeler artmaktadır.  $P_R$  değerlerinin azalması ile birlikte, yapı elemanı daha da dayanıklı olmaktadır. Bu sonuçlardan görülmektedir ki, malzeme sabit oranının, iki malzemeli kirişin mekanik davranışı üzerinde çok önemli bir etkisi vardır.

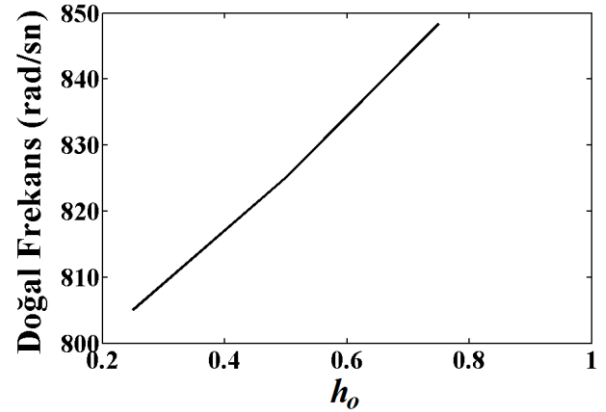


**Şekil 7.** Farklı malzeme sabit oranlarına göre kirişin yer değiştirmiş konumları a)  $P_R=1$ , b)  $P_R=2$ , c)  $P_R=4$  (The deflection shapes of the beam for different material constant ratio a)  $P_R=1$ , b)  $P_R=2$ , c)  $P_R=4$ ).

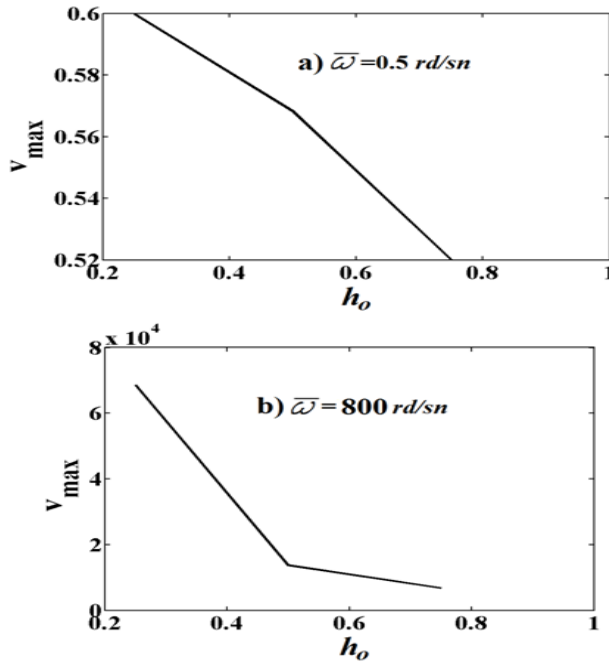
### 3.2. Malzeme Dağılım Oranının Etkisi ( $h_o$ )

(The Effect of the Material Distribution Ratio ( $h_o$ ))

Farklı Malzeme dağılım oranlarının kirişin doğal frekanslarına olan etkisi şekil 8'de, zorlanmış dinamik yüklem altında oluşan maksimum düşey yer değiştirmeye ( $v_{max}$ ) etkisi de şekil 9'de gösterilmiştir. Şekil 8 ve 9'deki grafiklerde malzeme sabit oranı sabit olup  $P_R=2$  alınmıştır. Şekil 9 da verilen zorlanmış titreşim grafiğinde, zorlayıcı yayılı yükün genliği  $q_o=0.5$  GPa alınmıştır olup, zorlayıcı kuvvetin frekansları  $\bar{\omega}=0.5$  rad/sn ile  $\bar{\omega}=800$  rad/sn alınmıştır.



**Şekil 8.** Malzeme dağılım oranı ile doğal frekans arasındaki ilişki (The relationship between the material distribution ratio and fundamental frequency).

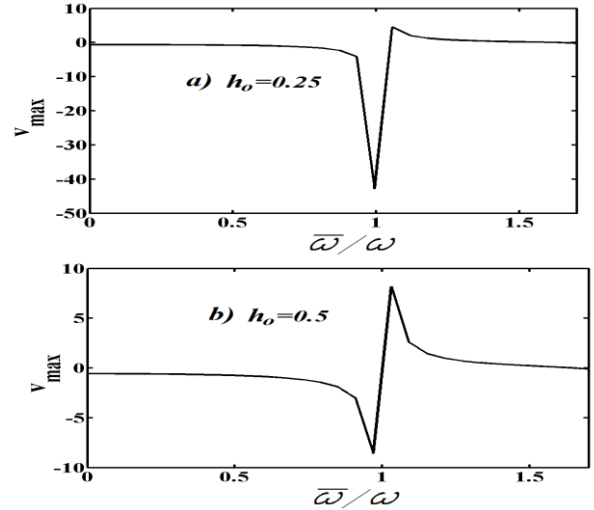


**Şekil 9.** Malzeme dağılım oranı ile maksimum düşey yer değiştirme arasındaki ilişki a)  $\bar{\omega}=0.5 \text{ rad/sn}$  için (The relationship between the material distribution ratio and maximum vertical displacement (for  $q=0.5 \text{ GPa}$ )).

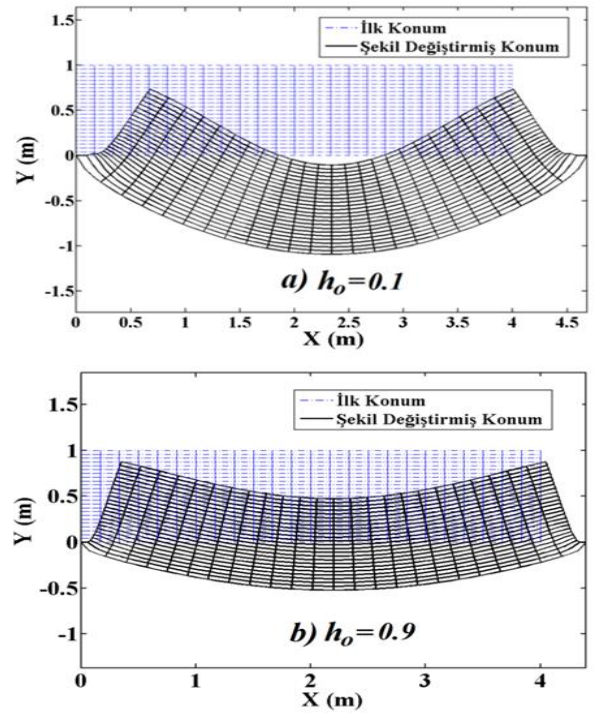
Şekil 8 ve 9'da görüldüğü gibi, malzeme dağılım oranı ( $h_o$ ) değeri arttıkça doğal frekanslar artmakta ve dinamik yer değiştirmeler ise azalmaktadır.  $h_o$  değerinin artması ile birlikte dayanım özellikleri üst malzeme sabitleri değerlerine göre yüksek olan alt malzeme, eşitlik (17b)'e göre hacmi artmakta, bunun neticesinde kirişin dayanımı da artmaktadır.  $h_o$  değerinin artmasına paralel olarak kiriş rijitliğinin de artması sonucunda, doğal frekans değerinde artma ve yer değiştirmeler de azalma olmaktadır. Ayrıca şekil 9 da görülmektedir ki, zorlayıcı yükün frekansının yapının doğal frekansından yakın olması durumunda,  $h_o$  değerinin değişmesiyle yer değiştirmeler daha hızlı değişmektedir.

Şekil 10'da, dinamik yer değiştirme ile frekans oranı arasındaki ilişki farklı  $h_o$  değerleri için gösterilmiştir. Şekil 10'da  $P_R=2$  ve  $q_0=0.5 \text{ GPa}$  değerleri alınmıştır. Şekil 10'da,  $h_o$  değerinin artması ile birlikte dinamik yer değiştirmelerin ciddi biçimde düştüğü görülmektedir. Ayrıca  $h_o$  değerinin artması ile kirişin rezonans durumuna karşı direncin arttığı görülmektedir.

Şekil 11'de, farklı  $h_o$  değerlerine göre iki malzemeli kirişin yer değiştirmiş konumları verilmiştir ( $P_R=4$  için). Şekil 11'de, farklı malzeme dağılımlarının ( $h_o$ ), kirişin zorlanmış titreşim davranışına olan etkisi yer değiştirmiş konumlar üzerinden etkili olduğu görülmektedir.  $h_o$  değerinin artması ile birlikte yer değiştirmeler ciddi biçimde azaldığı görülmektedir. Malzeme dağılımı seçiminin, iki malzemeli kompozit kirişin mekanik davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir.



**Şekil 10.** Farklı malzeme dağılım oranlarına göre maksimum düşey yer değiştirme ile frekans oranı arasındaki ilişki a)  $h_o=0.25$ , b)  $h_o=0.5$  (The relationship between the maximum vertical displacement and frequency ratio for different material distribution ratio, a)  $h_o=0.25$ , b)  $h_o=0.5$ ).



**Şekil 11.** Farklı malzeme dağılım oranlarına göre kirişin yer değiştirmiş konumları a)  $h_o=0.1$ , b)  $h_o=0.9$  (The deflection shapes of the beam for different material distribution ratio a)  $h_o=0.1$ , b)  $h_o=0.9$ ).

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

İncelenen çalışmada, iki malzemeli kompozit basit mesnetli bir kirişin serbest ve zorlanmış titreşimi, düzlem parçalı sürekli ortam modeli ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Problemin sayısal çözümleri için MATLAB programında algoritma ve program yazılmıştır. Farklı malzeme oranı ve

dağılımlarının, iki malzemeli kirişin dinamik davranışına olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan da görülmektedir ki, malzeme sabit oranının ve dağılımının, iki malzemeli kirişin dinamik davranışları üzerinde önemli bir etkisi olduğu, kirişin dayanıklılığını önemli derecede etkilediği görülmüştür. Böylesi kompozit yapıların tasarım ve üretilmesinde, en uygun malzeme ve dağılım parametrelerinin seçimi oldukça önemlidir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

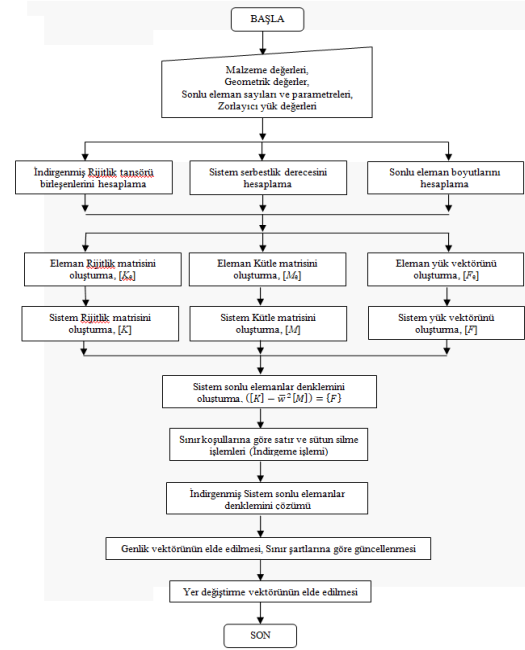
- [1] Doyle, J. F., "Force identification from dynamic responses of a bimaterial beam", *Experimental Mechanics*, 33:64-69, (1993).
- [2] Shu, D. ve Fan, H., "Free vibration of bimaterial split beam", *Composites Part B: Engineering*, 27:79-84, (1996).
- [3] Shu, D. ve MSRao, P., "Buckling analysis of bimaterial beams with single asymmetric delamination", *Composite structures*, 64:501-509, (2004).
- [4] Her, S. C. ve Su, W. B., "The Strain Energy Release Rate of a Bi-Material Beam with Interfacial Crack", *In Key Engineering Materials*, 306:369-374, (2006).
- [5] Yu, Y., Ashcroft, I. A. ve Swallowe, G., "An experimental investigation of residual stresses in an epoxy-steel laminate", *International journal of adhesion and adhesives*, 26: 511-519, (2006).
- [6] Zhang, Z. J. ve Paulino, G. H., "Wave propagation and dynamic analysis of smoothly graded heterogeneous continua using graded finite elements", *International Journal of Solids and Structures*, 44: 3601-3626, (2007).
- [7] Della, C. N. ve Shu, D., "Free vibration analysis of delaminated bimaterial beams", *Composite structures*, 80: 212-220, (2007).
- [8] Srinivasan, P. ve Spearing, S. M., "Optimal materials selection for bimaterial piezoelectric microactuators", *Journal of Microelectromechanical Systems*, 17: 462-472, (2008).
- [9] Batra, R.C., Porfiri, M. and Spinello, D., "Free and forced vibrations of a segmented bar by a meshless local Petrov-Galerkin (MLPG) formulation", *Computational Mechanics*, 41:473-491, (2008).
- [10] Eren, İ., "Analyses of large deflections for logarithmical bimodulus cantilever beams", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28:1359-1363, (2008).
- [11] Eren, İ., "İki Malzemeli Kompozit Konsol Kirişlerdeki Büyük Yer Değiştirmelerin İncelenmesi", *Fırat University Journal of Engineering*, 21: 109-114, (2009).
- [12] Wu, G.Y., "The analysis of dynamic instability of a bimaterial beam with alternating magnetic fields and thermal loads", *Journal of Sound and Vibration*, 327:197-210, (2009).
- [13] Lin, I. K., Zhang, X. ve Zhang, Y., "Thermomechanical behavior and microstructural evolution of SiN<sub>x</sub>/Al bimaterial microcantilevers", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19: 085010, (2009).
- [14] Carlberger, T. and Stigh, U., "Dynamic testing and simulation of hybrid joined bi-material beam", *Thin-walled structures*, 48:609-619, (2010).
- [15] Ivanova, J., Nikolova, G., Dineva, P. and Becker, W., "Interface Behavior of a Bimaterial Plate under Dynamic Loading", *Journal of engineering mechanics*, 136: 1194-1201, (2010).
- [16] Wang, M. ve Liu, Y., "Analytical solution for bi-material beam with graded intermediate layer", *Composite Structures*, 92:2358-2368, (2010).
- [17] Her, S. C., Lin, C. H. ve Yeh, S. W., "Thermal Stress Analysis of a Bi-Material Layered Structure", *In Key Engineering Materials* 450:161-164, (2011).
- [18] Petrova, V. ve Schmauder, S., "Thermal fracture of a functionally graded/homogeneous bimaterial with system of cracks", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 55:148-157, (2011).
- [19] Voicu, R., Muller, R. ve Pustan, M., "Investigation of dimensions effect on stress of bi-material cantilever beam", *In Proceedings of the 2011 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, 461-465, (2011).
- [20] Akbaş, Ş.D. "Geometrically nonlinear static analysis of edge cracked Timoshenko beams composed of functionally graded material", *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, (2013).
- [21] Akbaş, Ş.D., "Static analysis of a functionally graded beam with edge cracks on elastic foundation", *In Proceedings of the 9th International Fracture Conference*, İstanbul, (pp. 70-80), (2011).
- [22] Akbaş, Ş.D., "Kirişlerin Geometrik Doğrusal Olmayan Davranışlarının 3 Boyutlu Sürekli Ortam Modeli ile İncelenmesi", *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17:28-37, (2016).
- [23] Akbaş, Ş.D., "Large post-buckling behavior of Timoshenko beams under axial compression loads", *Structural Engineering and Mechanics*, 51: 955-971, (2014).
- [24] Akbaş, Ş.D., "Wave propagation analysis of edge cracked beams resting on elastic foundation", *International Journal of Engineering & Applied Sciences*, 6: 40-52, (2014).
- [25] Akbaş, Ş.D., "Wave propagation analysis of edge cracked circular beams under impact force", *PLoS one*, 9: e100496, (2014).
- [26] Akbaş, Ş.D., "Large deflection analysis of edge cracked simple supported beams", *Structural Engineering and Mechanics*, 54: 433-451, (2014).
- [27] Akbaş, Ş.D., "Post-buckling analysis of axially functionally graded three-dimensional beams", *International Journal of Applied Mechanics*, 7:1550047, (2015).
- [28] Kocatürk, T. ve Akbaş, Ş.D., "Geometrically non-linear static analysis of a simply supported beam made of hyperelastic material", *Structural Engineering and Mechanics*, 35:677-697, (2010).
- [29] Kocatürk, T. ve Akbaş, Ş.D., "Thermal post-buckling analysis of functionally graded beams with temperature-dependent physical properties", *Steel and Composite Structures*, 15:481-505, (2013).
- [30] Kocatürk, T. ve Akbaş, Ş.D., "Post-buckling analysis of Timoshenko beams with various boundary conditions under non-uniform thermal loading", *Structural Engineering and Mechanics*, 40: 347-371, (2011).
- [31] Akbaş, Ş.D. ve Kocatürk, T., "Post-buckling analysis of a simply supported beam under uniform thermal



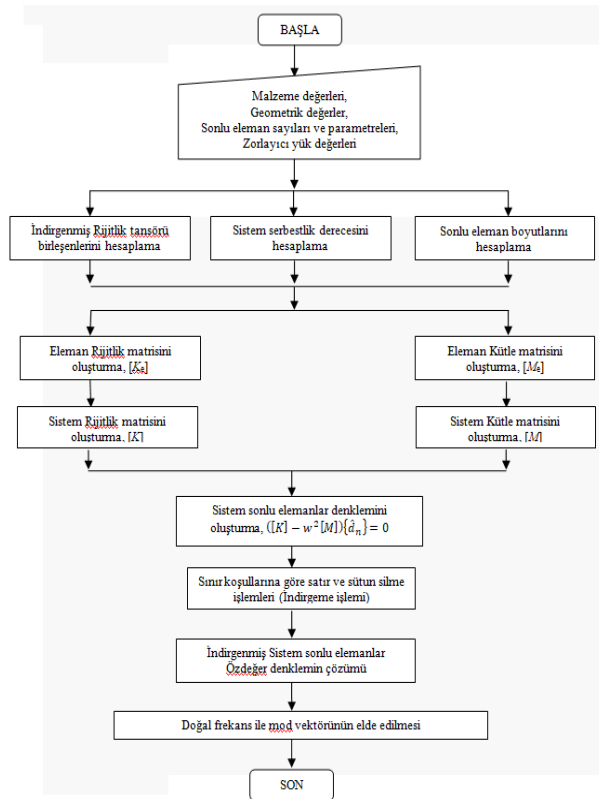
- loading", *Scientific Research and Essays*, 6:1135-1142, (2011).
- [32] Akbaş, Ş.D. ve Kocatürk, T., "Post-buckling analysis of Timoshenko beams with temperature-dependent physical properties under uniform thermal loading, *Structural Engineering and Mechanics*, 44: 109-125, (2012).
- [33] Akbaş, Ş.D. ve Kocatürk, T., "Post-buckling analysis of functionally graded three-dimensional beams under the influence of temperature, *Journal of Thermal Stresses*, 36: 1233-1254, (2013).
- [34] Kocatürk, T. Eskin, A. ve Akbaş, Ş.D. "Wave propagation in a piecewise homogenous cantilever beam under impact force", *International Journal of Physical Sciences*, 6: 3867-3874, /2011(.
- [35] Suhir, E. ve Nicolics, J., " Bending of a bi-material cantilever beam, with consideration of the role of the interfacial shearing stress", *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 92:573-582, (2012).
- [36] Wu, G. Y., "Non-linear vibration of bimaterial magneto-elastic cantilever beam with thermal loading", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 55:10-18, (2013).
- [37] Liu, Y. ve Shu, D. W., "Analytical solution of the vibration of delaminated bimaterial beams fully or partially supported by elastic foundation", *In Applied Mechanics and Materials*, 394: 75-79, (2013).
- [38] Petrova, V. ve Schmauder, S., "Modelling of thermal fracture of functionally graded/homogeneous bimaterial structures under thermo-mechanical loading", *In Key Engineering Materials*, 592:145-148, (2014).
- [39] Chama, M., Boutabout, B., Lousdad, A., Bensmain, W. ve Bouiadjra, B.A.B., "Crack propagation and deviation in bi-materials under thermo-mechanical loading", *Structural Engineering and Mechanics*, 50: 441-457, (2014).
- [40] Li, A.Q., Zhou, S.J., and Zhou, S.S., "The Size-Dependent Inherent Property Of Bilayered Micro-Beams", *Engineering Mechanics*, 31: 223-228, (2014).
- [41] ANSYS Workbench Release 14.0, SAS IP, Inc.

## EKLER (APPENDİK)

Zorlanmış titreşim çözümü için MATLAB'da yazılan programın algoritması:



Serbest titreşim çözümü için MATLAB'da yazılan programın algoritması:





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

**Türkiye ile AB Ülkelerinin katı atık yönetimi performanslarının malmquist endeksi ile karşılaştırılması**

*Comparison of solid waste management performances of Turkey and EU countries associated with Malmquist Index*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Zülal TÜZÜNER<sup>1</sup>, İhsan ALP<sup>2</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0003-1085-9399

*ORCID<sup>2</sup>:* 0000-0002-3819-6171

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Tüzüner Z. and Alp İ., “Comparison of solid waste management performances of Turkey and EU countries associated with Malmquist Index”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 75-81, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.386857

# Comparison of Solid Waste Management Performances of Turkey and EU countries associated with Malmquist Index

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Zülal TÜZÜNER<sup>1\*</sup>, İhsan ALP<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Science, Statistics Department, Gazi University, Turkey

<sup>2</sup> Faculty of Science, Statistics Department, Gazi University, Turkey

(Received : 28.12.2016 ; Accepted : 17.03.2017)

## ABSTRACT

In this study, it's aimed to determine the solid waste management performances of Turkey and EU countries with DEA. Waste and environmental data of the countries has been evaluated in this study for a period of seven years and performance changes of the countries has been examined by years through Malmquist Total Factor Productivity by establishing two different models. In first model, performance of the countries has been examined in terms of environment. Benefiting from the variables of waste management according to the waste categories (domestic and industrial) of the countries, waste generation excluding the important mineral wastes and municipal waste generation, it's aimed to achieve maximum of municipal waste recycle ratio, packaging wastes recycle ratio and packaging waste recovery ratios. In the second model, performance of the countries has been examined in economic terms. Benefiting from the public sector environmental investment amount (as GDP percentage) and environmental protection expenditures (million Euros) variables, it's aimed to achieve maximum of municipal waste recycle ratio, packaging wastes recycle ratio and packaging waste recovery ratios.

**Keywords:** Data envelopment analysis, solid waste management, Malmquist Index.

# Türkiye ile AB Ülkelerinin Katı Atık Yönetimi Performanslarının Malmquist Endeksi ile Karşılaştırılması

## ÖZ

Bu çalışmada iki farklı model kurularak, VZA ile AB ülkeleri ve Türkiye'nin katı atık yönetimi performanslarını belirlenmesi amaçlanmaktadır. Ülkelerin yedi yıllık atık ve çevresel verilerinin değerlendirildiği çalışmada, iki farklı model kurularak Malmquist Toplam Faktör Verimliliği yöntemi ile ülkelerin yıllara göre performans değişimleri incelenmiştir. Birinci modelde; ülkelerin performansı çevresel yönden incelenmiştir. Ülkelerin atık kategorisine göre ( ev ve iş yerleri) atık üretimi, önemli mineral atıklar hariç atık üretimi ve kentsel atık üretimi değişkenlerinden yararlanarak, kentsel atık geri dönüşüm oranı, ambalaj atıkları geri dönüşüm oranı ve ambalaj atıkları geri kazanım oranlarının maksimum olması amaçlanmıştır. İkinci modelde; ülkelerin performansı ekonomik yönden incelenmiştir. Kamu sektörü çevresel yatırım miktarı (GSYH yüzdesi olarak) ve çevre koruma harcamaları (milyon Euro) değişkenlerinden faydalanarak, kentsel atık geri dönüşüm oranı, ambalaj atıkları geri dönüşüm oranı ve ambalaj atıkları geri kazanım oranlarının maksimum olması amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Veri zarflama analizi, katı atık yönetimi, Malmquist indeksi.

## 1. INTRODUCTION

Environmental problems not only bear a global qualification but also vary according to the development levels of the communities in recent years. Wastes that originate as a natural result of life and waste management are the primary issues to which the communities have been approaching with an understanding of keeping out of sight. Solid wastes emerging from population growth, technological development, industrialization, urbanization, rapidly increasing and differentiating and

differentiating consumption are one of the important environmental problems due to their negative effects on environment and human health.

These problems have required the approach of evaluating the solid wastes in terms of environment and human health. Today, solid wastes became an issue needed to be managed while they were resources needed to be re-evaluated.

Solid waste management that is one of the approaches brought to solve the problems arising from the solid wastes is defined as a system developed for supporting a production with less wastes, recovery of solid wastes for raw materials or other purposes and application of

\*Corresponding Author  
e-posta : zualaturkoglu@gazi.edu.tr

disposal principles as not to damage earth, air, water environment and living creatures.

In this study, solid waste management and related concepts are generally included and it's tried to present what the issue is and it's evaluated how solid wastes are managed in Turkey and EU countries and what the problems are using the data from EU countries.

Two models are proposed in the study where waste and environmental data of the countries for seven years (2006-2012) are evaluated: In first model, performance of the countries has been examined in terms of environment. In this model, waste management according to the waste categories, waste generation excluding the important mineral wastes and municipal waste generation are used as inputs and municipal waste recycle ratio, packaging wastes recycle ratio and packaging waste recovery ratios are used as outputs. In the second model, performance of the countries has been examined in economic terms. In this model, public sector environmental investment amount and environmental protection expenditures are used as inputs and municipal waste recycle ratio, packaging wastes recycle ratio and packaging waste recovery ratios are used as outputs.

## 2. EUROPEAN UNION AND SOLID WASTE MANAGEMENT

EU policies regarding the conservation of environment and natural sources gained increasingly importance after 1980s. While protection of the environment is brought to European and international level, particularly pollution problems became significant in environment policy during the expansion process of EU. 6 principles are determined to make the sustainable development one of the objectives of European Community in Amsterdam Treaty. These are, complementarity, high level protection, reserve, prevention, prevention at the source and polluter pays principles.

Solid waste management is a sustainable factor based on recovery and efficient usage of the sources. It became necessary to follow the goals of reduction of waste generation, re-use and increase of recycle, controlled storage of non-utilizable wastes, establishment of a good relationship between solid waste management industries and ensuring environmental efficiency for the continuity of solid waste management in line with the sustainable progress.

## 3. MATERIAL and METHOD

Study data has been obtained from EUROSTAT. In this study, input and output variables selected for performance assessment are presented in Table 1. Package program DEAP Version 2.1 (Coelli, 1996) developed by Tim Coelli is used to determine the efficiency in the study. Statistical values for input and output variables are as shown in Table 2:

## 4. DATA ENVELOPMENT ANALYSIS

Data Envelopment Analysis (DEA) is a nonparametric linear programming technique used commonly for comparison of homogeneous decision making units. DEA is a linear programming process that can be defined as frontier analysis of many inputs and many outputs. From the point of the sectional-convex enveloping approach of Farrell (1957) to efficient frontier estimation, Charnes, Cooper and Rhodes gave DEA technique to the literature.

DEA compares the input and output levels of DMUs (Decision Making Units) and defines the efficient frontier by determining the best DMU. Converting the inputs into the outputs in the most effective way, DMU forms a part of the efficient frontier. Achieved performance measure is defined as efficiency.

In CCR model developed by Charnes Cooper and Rhodes, analysis is performed under the assumption of constant return to scale. In BCC model developed by Banker, Charnes and Cooper, analysis is performed under the assumption of variable return to scale (Banker et al, 1984).

CCR and BCC models can be classified in two groups; input-oriented and output-oriented. Input-oriented CCR model is expressed as follows:

$$\max y_k = \sum_{r=1}^s u_r y_{rk}$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad (j=1, \dots, n)$$

$$u_1, u_2, \dots, u_s \geq 0, \quad v_1, v_2, \dots, v_m \geq 0$$

Output-oriented CCR model is expressed as follows:

$$\min x_k = \sum_{i=1}^m v_i x_{ik}$$

Subject to:

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rk} = 1$$

$$u_1, u_2, \dots, u_s \geq 0$$

$$v_1, v_2, \dots, v_m \geq 0$$

Input-oriented BCC model is expressed as follows:

$$\max y_k = \sum_{r=1}^s u_r y_{rk} - u_0$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - u_0 \leq 0 \quad ,j=1,\dots,n$$

$$u_1, u_2, \dots, u_s \geq 0$$

$$v_1, v_2, \dots, v_m \geq 0$$

$u_0$ , free

Output-oriented BCC model is expressed as follows:

$$\min x_k = \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} - v_0$$

Subject to:

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rk} = 1$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - v_0 \geq 0, \quad j=1,\dots,n$$

$$u_1, u_2, \dots, u_s \geq 0$$

$$v_1, v_2, \dots, v_m \geq 0$$

$v_0$ , free

### 5. MALMQUIST TOTAL FACTOR PRODUCTIVITY INDEX

When performance of a production unit is measured with CCR model in a given year, frontier deviation in time can not be calculated with DEA as this measured efficiency remains constant. After Sten Malmquist (1953) created amount indexes like ratios of distance functions, Malmquist Productivity Index (MPI) introduced by Caves, Christensen and Diewart (1982) and developed by Fare, Grosskopf, Norris and Zhang (1994) calculates the movement in the frontier.

Malmquist productivity index indicates the distance of the inputs under constant technology to the outputs to be obtained in a different time. Without putting any limitation on production technology, it makes efficiency measurement via linear programming method for inputs and outputs. Production curve is created for each input and output and production technologies are determined. Determined technology level gives the efficiency ratio. Malmquist productivity index can be defined as follows in graphics:

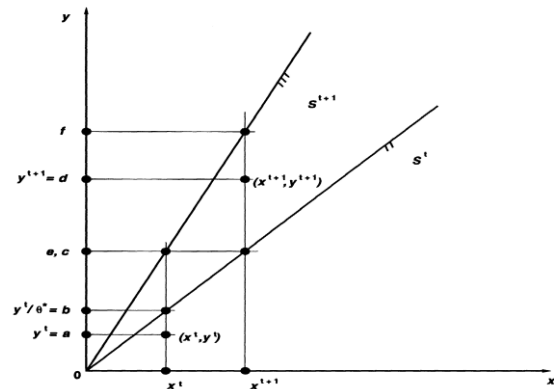


Figure 1. Output way Malmquist TFP index (Fare et al 1994:70)

$S^t$  and  $S^{t+1}$  are production technologies belonging respectively to  $t$  and subsequent  $t+1$ . Distance function aims the highest output proportional increase that is possible in the outputs with a certain input amount. In graphic, where  $x^t$  is data, the highest output amount for  $y^t$  is  $y^t/\theta$  point on the production frontier. Distance function of observation in  $(x^t, y^t)$  point based on the output is expressed with  $(0a/0b)$  ratio with a value below 1 with regards to distances in  $y$  axis. This ratio is the proportionately opposite of Farrell output-oriented technique efficiency criterion measuring how far an observation is away from the efficient production frontier.

$$D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}) = \frac{0d}{0f}$$

$$D_0^t(x^t, y^t) = \frac{0a}{0b}$$

$$\frac{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^t(x^t, y^t)} = \frac{(0d/0f)}{(0a/0b)}$$

$x^t$  input can produce the most efficient output in  $t$  time for  $0b$  but more input in  $(t+1)$  period up to  $0e$ .

Therefore,  $(0b / 0e)$  ratio expresses technological change measurement. If this ratio is greater than one unit, this expresses the technological development.

$$D_0^t(x^t, y^t) = \frac{0a}{0b}$$

$$D_0^{t+1}(x^t, y^t) = \frac{0a}{0c}$$

$$\frac{D^t(x^t, y^t)}{D^{t+1}(x^t, y^t)} = \frac{0c}{0b}$$

Thus, technological change:

$$\left[ \frac{D^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \times \frac{D^t(x^t, y^t)}{D^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{1/2} = \left[ \left( \frac{0d/0e}{0d/0f} \right) \left( \frac{0a/0b}{0a/0c} \right) \right]^{1/2} = \left[ \frac{0f}{0e} \times \frac{0c}{0b} \right]^{1/2}$$

is expressed with its equality. An important advantage of distance function is that it provides a suitable way to define more than one input and more than one output

production technology without the necessity of stating the functional forms like cost minimization and profit maximization (Kaneko and Managi, 2004).

For productivity change between t and t+1 periods, Malmquist Productivity Index is defined as follows for relative technology level in t period (Caves, Christensen, Diewert, 1982).

$$M_{CCD}^t = \frac{D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^t(x^t, y^t)}$$

Relative productivity change in technology in t+1 period can be formed as follows:

$$M_{CCD}^{t+1} = \frac{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^{t+1}(x^t, y^t)}$$

Fare et al (1994) proposed Malmquist Productivity Index for output-oriented productivity change from t period until t+1 period by taking the average of geometric average of these models.

$$M_0(x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t) = \left[ \left( \frac{D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^t(x^t, y^t)} \right) \left( \frac{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^{t+1}(x^t, y^t)} \right) \right]^{1/2}$$

This index can also be defined as follows:

$$M_0(x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t) = \left( \frac{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^t(x^t, y^t)} \right) \times \left[ \left( \frac{D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \right) \left( \frac{D_0^t(x^t, y^t)}{D_0^{t+1}(x^t, y^t)} \right) \right]^{1/2}$$

Ratio in brackets measures the technological change (TECHCH). Between t and t+1 periods, measures the change in production frontier. If TECHCH>1, production technology advanced between t and t+1 periods. If TECHCH<1, production technology degraded between t and t+1 periods. Ratio out of the bracket is called as efficiency change (EFFCH).

It gives the amount capturing the efficiency between t and t+1 periods. EFFCH>1 indicates that there is an increase in the efficiency of DMU concerned and EFFCH<1 indicates that there is a decrease in the efficiency of DMU concerned.

EFFCH calculated under the assumption of variable return to scale can be separated into pure efficiency change index (PECH) and scale efficiency change index (SECH).

Here,  $D_{VRS}^t(x^t, y^t)$  and  $D_{VRS}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})$  distance functions are calculated under the assumption of variable return to scale in t and t+1 periods. PECH defined as distance function of its own period under variable return to scale indicates the proximity of each production unit to the best unit in its own period. SECH is the ratio of the distance function under the assumption of constant return to scale to the distance function under the assumption of variable return to scale.

$$PECH_t^{t+1} = \left( \frac{D_{VRS}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_{VRS}^t(x^t, y^t)} \right)$$

$$SECH_t^{t+1} = \frac{D_{CRS}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_{CRS}^t(x^t, y^t)} \times \frac{D_{VRS}^t(x^t, y^t)}{D_{VRS}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}$$

The most important feature of Malmquist productivity index is that it explains the efficiency change and technological change for further decomposition of total factor productivity.

## 6. APPLICATION

**Table 1.** Input and output variables used in the study  
Model 1

Input Variables	Output Variables
According to the waste category waste production (1000 tones)	Recycling rate of municipal waste
Important mineral waste except waste production (per kg)	Recycling rates for packaging waste
Municipal waste production (per kg)	Recovery rates for packaging waste

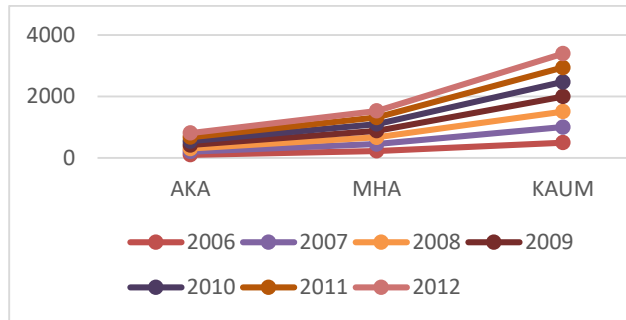
Model 2

Environmental investment by the public sector(GDP%)	Recycling rate of municipal waste
Environmental protection expenditure(100 million euros)	Recycling rates for packaging waste
	Recovery rates for packaging waste

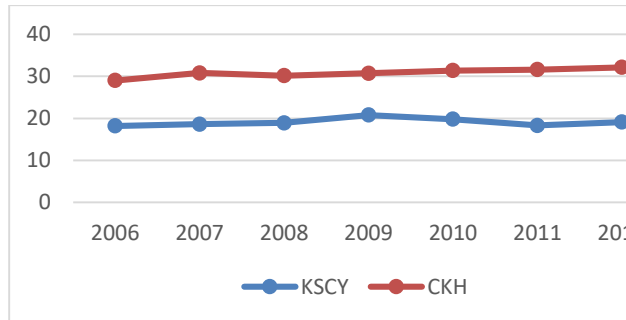
**Table 2.** Input and output variables of descriptive statistics

Variable	Mean	Standard deviation	Min	Max
According to the waste category waste production (1000 tones)	102,1	14,99	1,54	603,42
Important mineral waste except waste production (per kg)	218,7	156,863	67,82	849,47
Municipal waste production (per kg)	485,47	114,74	293,86	698,5
Environmental investment by the public sector (GDP%)	0,19	0,16	0,02	0,66
Environmental protection expenditure(100 million euros)	30,84	47,59	0,38	176,04
Recycling rate of municipal waste	28,17	18,74	0,67	63,17
Recycling rates for packaging waste	56,63	12,39	28,3	80,97
Recovery rates for packaging waste	68,13	19,7	28,49	99,87

Figure 2 and Figure 3 shows the average amount of the input variables used in the models.

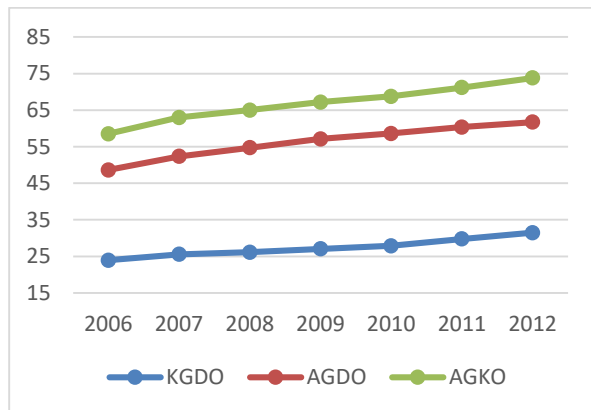


**Figure 2.** The average on the input variables used in the first model



**Figure 3.** The average on the input variables used in the second model

Figure 4, it shows the average values of the variables used in the model output.



**Figure 4.** The average change of the output variables used in the model

According to the solid waste management performance model based on environment, total factor productivity (TFP) changes of the countries by years are as given in Table 3.

In 2007, Slovakia is the best country with an increase of 70,9% in TFP. Considering the output variables of the country in 2007, it's seen that these variables increased for an average of 1.5 times compared to 2006. Malta is the country with the lowest performance with a decrease of 56.9% in TFP. It's seen that Turkey had an increase of 4,5% in TFP.

In 2008, Malta is the best country in terms of solid waste management performance with an increase of 37,4% in TFP contrary to 2007. Considering the output variables of Malta in

2008, it's remarkable that there is an increase for approximately 4 times compared to 2007. Slovakia is the country with the lowest performance with a decrease of 20,2% in TFP. Average 20% decrease in output variables may be shown as a reason for that case. A decrease of 08,7% in TFP is observed in that period in Turkey.

Considering the changes in 2009, Estonia is the best country with an increase of 34,9% in TFP change. With a decrease of 11,9% in TFP change in that period, Turkey is the country with the lowest solid waste management performance.

Compared to 2009, Slovenia is the best country in 2010 among Turkey and other EU countries with an increase of 22,9% in TFP. A decrease of 20,9% in TFP in Slovakia made the worst solid waste management performance of the country. Turkey showed a slight decrease in TFP in that period.

In 2011, the best change belongs to Malta in TFP compared to 2010. Denmark, on the other hand, is the country with the lowest performance. Turkey increased its TFP with a ratio of 19,3% in that year compared to 2010.

In 2012, Turkey is the best country in terms of solid waste management performance in that period with an increase of 34,7% in TFP. Lithuania is the country with the lowest solid waste management performance with a decrease of 9,6% in TFP.

**Table 3.** Environment based on changes in total factor productivity compared to solid waste management in the country according to the performance of the model

Countries	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Turkey	1,009	0,913	0,881	0,931	1,193	1,347
Slovakia	1,709	0,798	1,286	0,791	1,385	1,098
Bulgaria	1,252	0,849	1,286	1,087	1,118	1,075
Slovenia	1,208	1,027	1,004	1,229	1,359	1,141
Poland	1,244	0,878	1,067	1,102	0,976	1,037
Hungary	1,125	1,235	1,037	1,228	1,075	0,952
Spain	1,060	1,251	0,961	1,023	0,996	1,008
England	1,091	1,102	1,067	1,047	1,069	1,109
Lithuanian	1,166	1,177	1,224	1,022	1,006	0,904
Estonia	1,099	0,957	1,349	1,02	1,154	1,095
Finland	1,052	1,023	1,073	0,978	0,982	1,027
France	1,034	0,98	1,018	1,057	1,019	1,053
Belgium	1,055	1,082	0,961	0,988	0,999	0,993
Czech Republic	1,076	1,026	1,017	1,048	0,987	1,055
Denmark	0,858	1,236	0,965	0,986	0,847	1,003
Germany	1,003	0,991	0,975	0,966	0,981	0,996
Latvia	1,064	1,374	1,05	1,128	0,881	0,984
Luxembourg	1,023	1,056	0,948	0,969	1,078	1,077
Austria	0,998	1,048	1,088	1,11	1,765	0,725
Romania	1,038	1,058	1,238	1,216	1,377	1,3
Italy	1,027	1,008	1,121	1,022	1,063	1,054
Portugal	1,074	0,992	1,122	1,093	1,132	1,163
Netherlands	1,012	1,004	1,023	1,023	0,994	1,016
Sweden	0,995	0,997	1,088	1,054	1,014	0,996
Malta	0,431	1,374	0,965	1,132	1,695	1,019
Average	1,068	1,057	1,072	1,05	1,125	1,049

According to the solid waste management performance model based on economy, total factor productivity (TFP) changes of the countries by years are as given in Table 4.

Compared to 2006, Hungary is the country with the best change ratio with an increase of 142,3% in TFP in 2007. Significant increase of input variables used in the analyses compared to the previous year may be shown as the reason for the great increase in TFP change. The lowest performance in TFP change belongs to Malta compared to 2006. Compared to 2006, Turkey showed an increase of 27% in TFP in 2007.

Compared to 2007, Malta showed an increase of 200,16% in TFP in 2008. This important change was caused by the great changes in input variables used in the analysis compared to the previous year. Bulgaria is the country with the lowest performance in 2008. Turkey showed an increase of 16,7% in TFP index.

Romania is the best country in terms of TFP change in 2009. Slovenia is the country with the lowest TFP change performance in 2009. TFP change of Turkey made a slight positive progress.

Estonia increased its TFP change with a ratio of 98,1% in 2010 compared to the previous year. Hungary showed a decrease of 43,9% in TFP index change compared to 2009. Turkey's TFP change remained constant.

Spain had the best TFP change in 2001 with an increase of 326,1%. The lowest TFP change performance belongs to Estonia with a decrease of 49,7%. In that period, Turkey had a decrease of 7,9% in TFP change.

Romania became the best country with an increase of 162,7% in TFP in 2012. TFP change of Spain showed a decrease of 71,9% and thus it became the country with the lowest performance. Turkey had an increase of 3,5% in TFP.

**Table 4.** Economics based on total factor productivity changes over the years the country according to the solid waste management performance model

Countries	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Turkey	1,270	1,167	1,12	1	0,921	1,035
Hungary	2,423	1,593	1,092	0,561	1,699	0,779
Slovakia	1,834	0,754	1,4	0,617	1,008	0,934
Czech Republic	1,773	1,007	0,888	0,793	1,008	1,051
Poland	1,285	0,998	1,261	1,042	0,871	1,262
Germany	1,175	1,009	0,879	1,114	1,063	1,176
Belgium	1,161	0,972	0,97	1,899	0,784	0,935
Sweden	1,135	0,999	1,033	1,194	1,502	0,65
Italy	1,130	0,906	1,075	1,23	0,995	1,027
Finland	1,103	0,884	1,158	0,731	1,37	1,386
France	1,040	0,83	1,022	1,083	0,878	0,941
Slovenia	1,017	0,867	0,747	1,444	1,482	1,201
Estonia	0,970	0,959	0,612	1,981	0,503	0,685
Spain	0,952	1,172	0,799	1,386	4,261	0,281
England	0,945	0,957	1,005	0,983	1,002	0,911
Denmark	0,938	0,977	1,066	1,004	0,804	1,022
Netherlands	0,936	1,01	1,104	1,012	1	0,999
Luxembourg	0,927	0,918	0,812	1,379	0,919	0,727
Portugal	0,906	1,008	1,007	1,119	1,19	1,192
Bulgaria	0,888	0,716	1	1,778	1,044	0,903
Latvia	0,886	1,76	1,126	1,577	0,559	0,756
Lithuanian	0,856	1,251	0,779	0,876	1,683	1,05
Austria	0,812	0,945	0,924	1,158	1,298	0,958
Romania	0,525	1,022	1,288	0,799	0,892	2,627
Malta	0,309	3,16	1,216	0,712	2,616	0,621
Average	1,016	1,054	0,998	1,081	1,121	0,937

## 7. CONCLUSION and DISCUSSION

Amount and characteristics of the wastes thrown by the people as a result of domestic use vary depending on the factors such as socioeconomic level of the city they live in, type of the fuel used, food habits etc. Depending on the development levels of the countries, food wastes and inorganic wastes like ash in low-income countries are more and recyclable wastes are less. As the income level increases, amount of food waste decreases and amount of packaging wastes increases. The reason for that is the increase of the consumption of the packaged products in high-income countries. First goal in waste management is the prevention of the waste formation. If it's not possible to prevent, waste minimization should be ensured. If possible, occurring wastes should be used again and if it's not possible, recycling methods should be implemented to minimize the amount of wastes to be disposed. In case it's not possible to implement all these methods, wastes should be subjected first to the energy recovery and then to the disposal process. Through the solid waste management projects that are carefully planned and ensuring contribution, management of the solid wastes, one of the important problems, is a significant tool for elimination of the urban poverty as well as the environmental, economic and social efficiency. There isn't a management model that is valid for all communities and will give the same successful result in solid waste management. Each community needs to develop the best method that is applicable within its own capacity in compliance with the nature of the problem. Development level is related with the economic level, social structure, cultural structure of the country. As the social and cultural structure increases, environmental consciousness of the people will also increase and therefore, damage given to the environment will decrease.

In this study, solid waste management performance of Turkey and EU countries is put forward by establishing two different models. When average values are examined by years, according to the solid waste management performance model based on the environment, it's seen that total factor productivity index is greater than 1. When the TFP index of Turkey by years is compared to the average values, it can be concluded that generally Turkey is ahead of other EU countries on this subject. Same comment may be made also for the solid waste management performance model based on the economy. For two models, the best year is in 2011 in terms of the average of solid waste management performance. In solid waste management performance model based on environment, an increase with a ratio of 5,9% occurred in TFP of EU countries. In other words, countries increased their production capabilities in time and increased the level of efficient production frontier and generated more outputs with the same input amount. Turkey showed an increase with a ratio of 3,3% in total factor productivity. In the solid waste management, this means that when waste management according to the waste categories, waste generation excluding the important mineral wastes



and municipal waste generation remains the same, an increase occurs in municipal waste recycle ratio, packaging wastes recycle ratio and packaging waste recovery ratios. Technological progress made by Turkey can also be evaluated as the success to reach the efficient frontier. In solid waste management performance model based on economy, an increase with a ratio of 3,3% occurred in TFP of EU countries. Turkey showed an increase with a ratio of 7,9% in total factor productivity. In other words, when the public sector environmental investment and environmental protection expenditures remains the same, an increase occurs in municipal waste recycle ratio, packaging wastes recycle ratio and packaging waste recovery ratios.

## REFERENCES

- [1] Banker R.D., Charnes A. and Cooper W.W., "Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis", *Management Science*, 30(9): 1078-1092, (1984).
- [2] Baud I., Grafakos S., Hordijk M. and Post J., "Quality of Life and Alliances in Solid Waste Management", *Cities*, 18(1): 3-12, (2001).
- [3] Caves D.W., Christensen L.R. and Diewert W.W., "Multilateral Comparisons of Output, Input, and Productivity Using Superlative Index Numbers", *Economic Journal*, 92: 73-86, (1982).
- [4] Charnes A., Cooper W.W. and Rhodes E.L., "Measuring the Efficiency of Decision Making Unit", *European Journal of Operational Research*, 2(6): 429-444, (1978).
- [5] Coelli T., "A Guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis (Computer) Program", *CEPA Working Papers*, 96 (08): (1996).
- [6] Fare R., Grosskopf S., Norris M. and Zhang Z., "Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries", *The American Economic Review*, 84(1): 66-83, (1994).
- [7] Farrell M.J., "The Measurement of Productive Efficiency", *Journal of Royal Statistical Society Series A (General)*, 120 (3): 253-281, (1957).
- [8] <http://ec.europa.eu/eurostat>.
- [9] Kaneko S. and Managi S., "Environmental Productivity in China", *Economics Bulletin*, 17(2): 1-10, (2004).
- [10] Malmquist S., "Index Numbers and Indifference Surfaces", *Trabajos de Estadística*, 4(2): 209-242, (1953).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

## Farklı oranlarda geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonun bazı mühendislik özelliklerinin araştırılması

### *Investigation of some engineering properties of concrete made with recycled aggregate in different ratios*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Hassan POURGHADRI SEFIDEHKHAN<sup>1</sup>, Osman ŞİMŞEK<sup>2</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0003-3665- 894X

*ORCID<sup>2</sup>:* 0000-0003-3842-5541

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Pourghadri S. H. ve Şimşek O. , “Farklı oranlarda geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonun bazı mühendislik özelliklerinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 83-91, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.391789

# Farklı Oranlarda Geri Dönüşüm Agregası Kullanılarak Üretilen Betonun Bazı Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Hassan POURGHADRI SEFIDEHKHAN\*, Osman ŞİMŞEK**

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 31.12.2016 ; Kabul/Accepted : 18.01.2017)

## ÖZ

Beton günümüzde yaygın kullanılan bir yapı malzemesidir. Betonun %70-75'i agregası olmasından dolayı geri dönüşüm agregası (GDA)'nın beton üretiminde kullanılması konusunda birçok araştırmacı çalışma yapmaktadır. Atık beton dolayısıyla atık agregası kullanımı çevresel, ekolojik ve ekonomik etkilerinin yanı sıra enerji sarfiyatını ve doğal hammadde tüketimini de azaltmaktadır. Bu çalışmada atık betonlardan elde edilen agregası ve bu agregası ile üretilen betonun mühendislik özellikleri incelenmiştir. Araştırmada GDA % 0, 20, 40, 60, 80 ve 100 olarak kırma agregası (KTA) ile ince ve iri olarak ikame edilerek beton üretiminde kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R çimentosu ve çimento ağırlığının %20'si oranında uçucu kül ikame edilerek beton örnekleri üretilmiştir. GDA ikameli betonun 28 ve 90 günlük basınç dayanımı, 90 günlük betonlarda ıslanma kuruma sonrası dayanım kaybı ve aderans dayanımı belirlenmiştir. GDA'sının KTA'ya göre daha yüksek su emme oranına sahip olmasından dolayı GDA ikame oranı arttıkça taze betonda çökme değeri azalmıştır. Kontrol betonu (KB) bütün yaşlarda en yüksek dayanımı vermiş ve GDA ikame edildiğinde basınç dayanımında düşüş gözlemlenmiştir. GDA ikameli betonların aderans dayanımı ve ıslanma kuruma sonrası basınç dayanımlarının KB'a göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Geri dönüşüm agregası, atık beton, basınç dayanımı, ıslanma kuruma, donatı aderansı.

# Investigation of Some Engineering Properties of Concrete Made With Recycled Aggregate in Different Ratios

## ABSTRACT

Nowadays concrete is the most commonly used construction material. Many researchers are investigating the use of recycled aggregate in concrete because 70-75% of concrete is composed of aggregates and using aggregates produced from waste concrete has environmental, ecologic and economic impacts and reduces the energy and natural resources consumption. In this study properties of aggregates provided from crushing waste concrete and also engineering properties of concrete made from these aggregates have been investigated. Fine and coarse recycled concrete aggregates (RCA) were replaced in the ratio of 0, 20, 40, 60, 80 and 100% with fine and coarse crushed aggregates in concrete mix design. CEM I 42,5 R cement was used as a binder and replaced by 20% of the cement's weight with fly ash in all mixtures. Due to the high water absorption of the RCA in comparison to the crushed aggregates, the slump was decreased by increasing RCA substitution ratio in the mixtures. Control concrete (CC) has gained the highest compressive strength in all ages. 28 and 90-day compressive strength of normally cured concretes, the bond strength between concrete specimens and rebars and compressive strength of concretes subjected to the wetting and drying cycles were decreased by increasing RCA substitution ratio in the mixtures.

**Keywords:** Recycled concrete aggregate, waste concrete, compressive strength, wetting and drying, bond strength between rebars and concrete.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beton günümüzde yaygın kullanılan bir yapı malzemesidir. Betondan bazı fiziksel ve mekanik özellikler beklenmektedir. Bunlar istenilen hedef dayanım, servis ömrü boyunca çevresel etkilere karşı yeterli dayanıklılığa ve hacim sabitliğine sahip olmasıdır [1, 2]. Dünyada yıllık beton ihtiyacı yaklaşık 4,5 milyar ton olduğu düşünüldüğünde, yıllık kişi başı beton

tüketimi ortalama 0,7 tondur. Geleneksel beton üretiminde genellikle doğal, kırma ve geri kazanılmış olmak üzere üç tip agregası kullanılmaktadır [3]. Betonun %70-75'ini agregası olmasından dolayı yeni arayışlar üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. GDA'sının beton üretiminde kullanılması konusunda birçok araştırmacı GDA'nın fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerine inceleme yapmıştır [1].

Bir yanda tükenen agregası kaynakları, diğer yanda ise deprem, yangın, bozulma ve restorasyon gibi nedenlerle oluşan yıkıntı atıklarının büyük miktarlarda olması

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : hassan.pourghadri.sefidehkh@gazi.edu.tr

çevresel, ekolojik ve ekonomik olarak birçok problem doğurmaktadır [2, 4]. Geleneksel beton üretiminde ağırlıkça yaklaşık % 12 çimento, % 8 karışım suyu ve % 75 agrega kullanılmaktadır. Bununla birlikte büyük miktarda agrega kullanımı ekolojik sistemini de önemli derecede etkilemektedir [1, 5]. GDA kullanımını enerji ve doğal hammadde tüketimini azaltmaktadır. Bu konulara sürdürülebilir kalkınma kapsamında ilgi artmaktadır [6]. Ekonomik açıdan bakıldığında, beton hacminin yaklaşık %40'ını oluşturan iri agreganın maliyeti 1 m<sup>3</sup> hazır beton üretim maliyetinin yaklaşık %14'ü, taş unu (%5) ile birlikte alındığında %19-20'sini oluşturmaktadır. Bu büyüklük ile iri agrega toplam maliyetteki payı çimento maliyetinden (%40) sonra ikinci sıradadır ve bu konunun ekonomik boyutunun önemini ifade etmektedir [7]. GDA, doğal agregadan oldukça farklı olan birçok özelliğe sahiptir. GDA doğal agreganın yüzeyine çimento hamuru yapışması ile oluşan betonun kırılmasıyla meydana gelmektedir. Bu çimento hamuru miktarı, GDA'nın su emme, yoğunluk, aşınma direnci, aderans gibi özelliklerini etkilemektedir [8, 9].

GDA'nın boşluklu yapısı ve yüzeyine yapışmış eski harç tabakasından dolayı doğal agregaya göre su emme oranı yüksek, yoğunluğu ise az olmaktadır. Yapılan araştırmalarda GDA'nın su emme oranı %4 ila %12 arasında değişirken doğal agreganın su emme oranı %0,5 ila %1 arasında değişmektedir [10].

Köken vd. [11], çalışmalarında ince agregaların (0-4 mm) ortalama su emme değerlerini %10,64 ve iri agregaların (4-16 mm) ortalama su emme miktarını % 4,62 olarak tespit etmişlerdir. İnce agregaların yoğunluğunu 2,69 g/cm<sup>3</sup> ve iri agregaların yoğunluğunu 2,67 g/cm<sup>3</sup> olarak bulmuşlardır. Brito vd. [12], geri dönüşüm agregaları 0-10 mm ve 10-20 mm boyutunda kullanmışlar ve yoğunluklarını sırasıyla 2,65 g/cm<sup>3</sup> ve 2,66 g/cm<sup>3</sup>, su emme oranlarını ise %4,57 ve %4,66 olarak bulmuşlardır.

Hansen ve Narud [13], yaptıkları çalışmada yüksek dayanımlı ve düşük dayanımlı betondan elde edilen 8-32 mm boyutundaki geri dönüşüm agregaların aşınma kaybı yüzdesini sırasıyla % 22,4 ve % 41,4 olarak bulmuşlar ve geri dönüşüm agregalarının aşınma kaybı yüzdelerinin doğal agregaya göre çok daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Doğal agreganın yerine %100 GDA konulması durumunda üretilen betonun hava içeriği biraz (%4-5,5) fazladır. Hava içeriğindeki bu fazlalık GDA'nın yüksek poroziteli olmasına dayandırılır. Dolayısıyla üretilen betonun birim hacim ağırlığının az olmasına neden olur [10, 14].

Geri dönüşüm agrega kullanılması taze betonun işlenebilirliği üzerinde olumsuz etki yapmaktadır [15]. %100 GDA ile üretilen betonlarda %25 oranında bir çökme kaybı olduğu bilinmektedir [16]. Durmuş vd. [17], iri GDA farklı oranlarda kullanarak ürettikleri betonların çökme değerlerinin 18 ile 22 cm arasında değiştiğini ve geri dönüşüm ikame oranı arttıkça çökme miktarının düştüğünü ve GDA'lı betonun özelliklerinin daha iyi

olması için 0-2 mm tane boyutundaki kısmın doğal kum olması gerektiğini belirtmişlerdir [18].

GDA'nın su emme miktarının fazla olmasından dolayı bu tip agrega içeren betonların rötre miktarı oldukça fazla olduğu bilinmektedir. Bu durum GDA yüzeyine yapışmış harcın yüksek şekil değiştirilebilirliğe sahip olmasıyla açıklanabilir. Brito vd. [12], yaptıkları çalışmada 90 günlük rötre değerlerini doğal agregalı ve %100 GDA'lı beton için sırasıyla 480 µm/m ve 560 µm/m olarak elde etmişlerdir.

Turanlı [19], çalışmasında beton atıklarını yeni beton yapımında, iri agrega olarak kullanmış ve GDA ile üretilen betonun normal betona göre basınç dayanımının % 12 daha az olduğunu görmüştür. Demirel [20] çalışmasında, kırma iri ve ince agrega yerine % 10, 20, 30, 40, 50 oranlarında geri dönüşüm agregası kullanmış ve GDA ikame yüzdesi arttıkça beton basınç dayanımının düştüğünü belirtmiştir. Tüfekçi [21], çalışmasında doğal agregayı, GDA ile %0, %25, %50 ve %100 oranlarında ikame etmiştir. Sonuç olarak GDA yer değiştirme oranı arttıkça beton basınç dayanımının benzer veya çok az değişiklik gösterdiğini belirtmiştir.

Kim vd. [22] çalışmalarında kontrol numunesi, %30, %60 ve %100 GDA ikameli betonların aderans dayanımını sırasıyla 21,67 MPa, 21,34 MPa, 21,22 MPa ve 18,73 MPa olarak bulmuşlardır. Önceki çalışmaların donatı aderans deney sonuçları incelendiğinde GDA ikame oranı arttıkça aderans dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir. Bunun sebebi GDA dayanımının KTA dayanımından daha az olduğu şeklinde açıklanabilir [22-24].

Uçucu kül; termik santrallerde baca gazları ile taşınarak siklon veya elektro filtrelerde toplanan önemli bir yan üründür. Bu küresel şekilli kül tanecikleri çok ince (0,5-150 mikron) tanelidir [24,25]. ASTM C 618'e göre SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %70'den fazla ise F sınıfı, %70 küçük %50 büyük ise C sınıfı olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca küllerin CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli, %10'dan fazla olduğu için yüksek kireçli olarak da adlandırılırlar [26-28].

Beton karışımı içinde uçucu kül kullanımı genel olarak 90 günden küçük yaşlarda mukavemetini azaltırken daha sonraki yaşlarda artırmaktadır. Kül oranı arttıkça dayanım azalmaktadır yani kül oranı ile basınç dayanım arasında ters ilişki vardır [26].

Uçucu küllü betonun priz süresi daha uzundur. Uçucu külün priz süresine etkisi, uçucu kül karakteristiklerine ve kullanım miktarına bağlıdır [29,30]. Wang vd. [31]'nin betonun plastik rötre üzerine yaptıkları çalışmada uçucu kül içeriğinin artmasıyla su kaybı artmakta, plastik rötre çatlaklarının toplam alanının da azaldığı görülmektedir. Lee vd. [32]'nin uçucu kül kullanarak yaptıkları çalışmada, düşük su/bağlayıcı oranına sahip betonlarda uçucu kül katkısı arttıkça bünyesel rötre azalmaktadır.

İslenme kuruma etkisi betonu hem fiziksel hem de kimyasal yolla etkilemektedir. Tekrarlı islenme kuruma

ve aşınma sonucu önce ince agregaların beton kütlelerinden ayrılmaya başladığı, açığa çıkan iri agregaların da zamanla yok olduğu ve daha fazla çimento hamuru bağlayıcı matrisinin bu etkilere açık hale geldiği görülür [33].

Bu çalışmada atık betonlardan elde edilen agreganın farklı oranlarda kırmataş agrega ile ikame edilerek üretilen betonun mühendislik özellikleri kontrol beton (KB) ile karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

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

### 2.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada, geri dönüşüm agregaları (GDA) daha önce dökülmüş C20 sınıfı betondan elde edilerek ve kırmataş agregası (KTA) ile belirli oranlarda ikame edilerek araştırmada kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R çimentosu ve çimento ağırlığının %20'si oranında uçucu kül ikame edilmiş ve beton karışım suyu olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

Çalışmada kalker esaslı KTA, Ankara Limak firmasından temin edilmiştir. GDA'sı 5 yıl öce dökülmüş 210 cm×240 cm boyutunda bloklardan elde edilmiştir. İlk önce 7 adet 75 mm çapında ve 150 mm yüksekliğinde karot alınarak beton sınıfı belirlenmiş, daha sonra bloklar elektrikli kırıcı (Şekil 1) ve çeneli kırıcı ile agrega boyutuna getirilmiştir.



**Şekil 1.** Geri dönüşüm agrega elde edilmesi ve karot alınması  
(The process of producing recycled concrete aggregate and drilling core samples)

### 2.2. Metot (Method)

GDA ve KTA üzerinde Elek analizi, Tane yoğunluğu, Su emme oranı, Yassılık endeksi ve Parçalanma direnci deneyleri yapılmıştır.

Taze betonların çökme (slump) ve birim ağırlığı incelenmiştir. Sertleşmiş beton numuneler üzerinde 28 ve 90 günlük basınç dayanımı, 90 günlük numuneler üzerinde ıslanma kuruma sonrası dayanım kaybı ve donatı aderansı deneyleri yapılarak GDA'sının bu özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Deneyle ilgili çalışmalar Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Beton Laboratuvarında yapılmıştır.

GDA üretiminde kullanılan atık betonun sınıfını belirlemek üzere alınan karot numunelerinin basınç dayanımı aritmetik ortalamasının 20 MPa olduğu saptanmıştır.

Tane Büyüklüğü Dağılımı; Ögütülmüş geri dönüşüm agregaları elenip ince agrega (0-4 mm), ince çakıl (4-11,2 mm) ve iri çakıl (11,2-22,4 mm) olmak üzere üç sınıfa ayrılmıştır. Her bir agrega grubu için tane büyüklüğü dağılımı TS EN 933-1 esas alınarak yapılmıştır [35].

Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini; Agregalarının tane yoğunluğu ve su emme oranları TS EN 1097-6' esas alınarak [36] belirlenmiştir.

Tane Şekli Tayini- Yassılık endeksi; TS EN 933-3 esas alınarak yapılmıştır [37]. Tane büyüklüğü fraksiyonlarında  $d_i/D_i$  çubuklar arası açıklığı  $D_i/2$  olan paralel çubuklu eleklerden elenir. Her bir tane büyüklüğü fraksiyonunun  $d_i/D_i$  yassılık endeksidir.

Parçalanma Direncinin Tayini; TS EN 1097-2'de [38] belirtilen Los Angeles metodu esas alınarak, 14 mm elekten geçen ve 10 mm elekte kalan agregalara uygulanır. Aşındırma işleminden sonra agrega 1,6 mm'lik elek kullanılarak yıkanır ve elek üzerinde kalan agrega miktarı belirlenir.

Çizelge 2 incelendiğinde GDA'nın teknik özellikleri KTA'a göre daha olumsuzdur. Yani yoğunluğu daha küçük, su emmesi daha yüksek, aşınma direnci daha

**Çizelge 1.** Çimento ve uçucu külün teknik özellikleri (Technical properties of cement and fly ash)

Kimyasal Kompozisyon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Serbest CaO	Kızdırma Kaybı	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
CEM I 42,5	20,35	5,98	3,06	63,35	1,89	2,71	0,58	0,88	1,22	0,5	3,1
UK	55,44	24,93	6,33	2,18	2,38	0,14	0,49	3,87	0,32	1,82	2,13

Çalışmada CEM I 42,5 R çimentosu ve Çatalağzı Termik Santrali'nden temin edilen F sınıfı uçucu külü kullanılmıştır. Çimento ve uçucu külü (UK)'n teknik özellikleri Ankara Limak çimento fabrikası laboratuvarında yaptırılmış ve sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir.

Çalışmada karışım suyu olarak Ankara ili şehir şebeke suyu ve CHRYSO FLUID PREMIA 196 adlı TS EN 934-2+A1'e uygun akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır [34].

düşük, yassılık oranı daha yüksek olduğu açık olarak görülmektedir.

Araştırmada beton tasarımında beton sınıfı C25 seçilmiştir. Karışım hesabında TS 802/2016 esas alınmıştır [39]. Beton tasarımında değişken olarak iri ve ince KTA'sı, GDA ile ağırlıkça %0, 20, 40, 60, 80 ve %100 oranlarında yer değiştirilmiştir. TS 802'ye göre S/Ç oranı 0,50 ve su miktarı 157 lt olarak seçilmiştir. Hesaplamalar sonucu çimento miktarı 314 kg/m<sup>3</sup> olarak bulunmuş. Çimentonun ağırlıkça %20'si UK ile ikame

edilmiş ve UK  $63 \text{ kg/m}^3$  olarak bulunmuştur. Yani karışımda bağlayıcı (251 kg çimento+63 kg UK ) sabit olarak alınmıştır. İşlenebilirliği artırmak için bağlayıcı ağırlığının %0,8'i oranında kimyasal katkı maddesi  $2,5 \text{ kg/m}^3$  ve hapsolmuş hava miktarı ise  $18 \text{ dm}^3/\text{m}^3$  alınmıştır. Gerekli agrega miktarının hacmi hesaplanmış

Islanma kuruma deneyi için  $10 \times 20$  cm boyutunda silindirik numuneler dökülmüştür. Öner vd.'nin [33] çalışmalarında kullandıkları yöntem esas alınarak ıslanma kuruma çevriminde, 24 saat  $105^\circ\text{C}$  etüvde kurutulan numuneler, 48 saat normal su içerisinde tam doymuş hale getirilmiş, deney gününe kadar bu çevrimler

**Çizelge 2.** Agregaların teknik özellikleri (Technical properties of aggregates)

Agrega grupları	0-4 mm		4-11,2 mm		11,2-22,4 mm	
	GDA	KTA	GDA	KTA	GDA	KTA
Yoğunlukları ( $\text{kg/dm}^3$ )	2,43	2,68	2,42	2,57	2,38	2,55
Su emme (%)	4,60	1,79	4,19	1,82	4,80	1,89
Yassılık endeksi	-	-	12,5	1,51	16,81	1,60
Aşınma direnci kaybı (%)	-	-	-	-	40,56	16,89

ve daha sonra ağırlıklar bulunmuştur. Agregalar oranları, %39 ince agrega (0-4 mm) ve %32 ince çakıl (4-11,2 mm) ve %29 iri çakıl (11,2-22,4 mm) kullanılmıştır. Hesaplamalar sonu, Agregalar miktarı 1834 kg olarak elde edilmiştir.

Taze beton birim ağırlığı TS EN 12350-6 standardına uygun olarak yapılmıştır [40]. Taze beton işlenebilirliğinin belirlenmesi amacıyla çökme deneyi yapılır. Çökme miktarının belirlenmesinde TS EN 12350-2 standardı esas alınmıştır [41].

Betonların basınç dayanımlarının belirlenmesinde TS EN

tekrarlanmıştır. 90 günlük numuneler üzerlerinde toplam 10 ıslanma kuruma çevrimi yapıldıktan sonra basınç testine tabi tutularak basınç dayanımları belirlenmiştir.

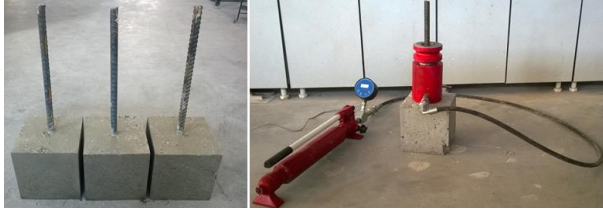
Donatı aderans testi, donatıların aderans dayanımlarını tespit etmek için kullanılır. RILEM/CEB/FIP'de donatının betona gömülü uzunluğu için 5φ alt sınır olarak belirtilmiştir. Bu çalışmada donatının betona gömülü boyu 9φ olarak seçilmiştir [43]. Numune üretiminde  $20 \times 20 \times 20$  cm küp kalıpların içine 20 mm çapında nervürlü çubuk, 18 cm'si betonda kalacak şekilde konmuştur. Donatı aderans testinde Şekil 2'de görüldüğü

**Çizelge 3.** Beton karışımlarının geri dönüşüm agrega ikame oranları (Substitution ratios of recycled concrete aggregates)

Karışım kodu	GDA İkame Oranı %	Agrega grupları					
		0-4 mm		4-11,2 mm		11,2-22,4 mm	
		GDA	KTA	GDA	KTA	GDA	KTA
KB	0	0	50	0	25	0	25
GB	100	50	0	25	0	25	0
GDA <sub>İNCE20</sub>	20	10	40	0	25	0	25
GDA <sub>İNCE40</sub>	40	20	30	0	25	0	25
GDA <sub>İNCE60</sub>	60	30	20	0	25	0	25
GDA <sub>İNCE80</sub>	80	40	10	0	25	0	25
GDA <sub>İNCE100</sub>	100	50	0	0	25	0	25
GDA <sub>İRİ20</sub>	20	0	50	5	20	5	20
GDA <sub>İRİ40</sub>	40	0	50	10	15	10	15
GDA <sub>İRİ60</sub>	60	0	50	15	10	15	10
GDA <sub>İRİ80</sub>	80	0	50	20	5	20	5
GDA <sub>İRİ100</sub>	100	0	50	25	0	25	0

12390-3 esas alınmıştır [42]. Basınç dayanımı  $10 \times 20$  cm silindirik numuneler kullanılmıştır. Her bir karışım için 28 ve 90 günlük yaşlarında basınç deneyine tabi tutulmak için ve her yaş grubundan üçer tane numune olmak üzere toplam 6 adet numune üretilmiştir.

gibi 30 ton kapasiteli dijital göstergeli hidrolik krikolar kullanılmıştır.



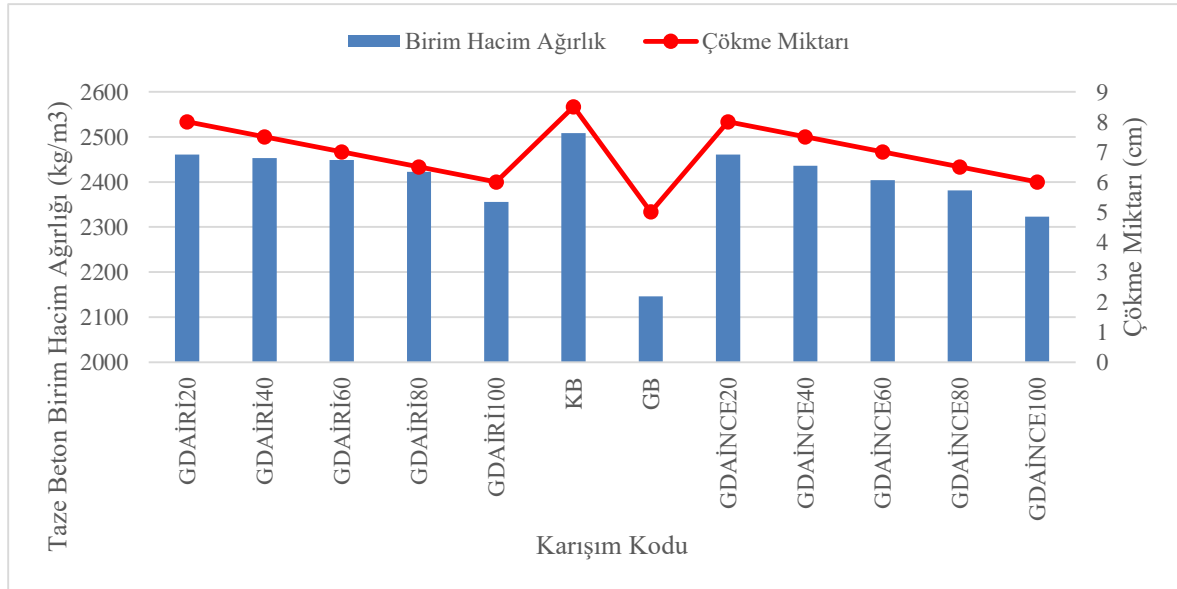
Şekil 2. Donatı aderans numuneleri ve 30 ton kapasiteli hidrolik kriko (Specimens of bond strength test and hydraulic jack with 30 tons of capacity)

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Taze beton birim hacim ağırlık deneyi basınç dayanımı için üretilen 10×20 silindir numuneler üzerinde yapılmış ve sonuçlar cm olarak Şekil 3'te, kontrol betonu (KB)'a göre yüzdelik değerleri ise Çizelge 4'te verilmiştir. Bütün karışımlarda taze beton birim hacim ağırlıkları 2146  $kg/m^3$  ile 2508  $kg/m^3$  arasında değişiklik göstermiştir.

Çizelge 4. Karışımların taze beton birim hacim ağırlık ve çökmelerinin KB'a göre yüzdelik değerleri (Percentage values of bulk densities and slump values of fresh concretes according to CC)

Karışım Kodu	GDAİRİ İkame Yüzdesi					KB	GB	GDAİNCE İkame Yüzdesi				
	20	40	60	80	100			20	40	60	80	100
Birim Hacim Ağırlık (%)	98,1	97,8	97,6	96,6	93,9	100	85,6	98,1	97,1	95,8	95,0	92,6
Çökme Miktarı (%)	94	88	82	76	71	100	59	94	88	82	76	71



Şekil 3. Karışımların birim hacim ağırlık ve çökme değerleri (Bulk densities and slump values of fresh concretes)

Çizelge 4 incelendiğinde GDA oranı arttıkça taze beton birim hacim ağırlığı (BHA) azalmaktadır. Ayrıca GDAİRİ ve GDAİNCE agregalarıyla üretilen betonun BHA karşılaştırılırsa GDAİNCE ile üretilen betonun BHA azalmaktadır. En yüksek taze beton birim hacim ağırlığını KB karışımı verirken en düşük birim hacim ağırlığı GB karışımı vermiştir. GB taze betonun birim hacim ağırlığı KB taze betonunkinden %15 daha

düşüktür. Sıkıştırma ve yerleştirme BHA'nı etkilemekte ve sonuçlarda önemli ölçüde farklılıklar göstermektedir.

Beton karışım hesabı yapılırken tüm karışımlarda s/ç oranı sabit tutulduğu için farklı çökme değerleri elde edilmiştir. Slump testi sonunda elde edilen değerler kontrol betonu (KB)'a göre yüzdelik değerleri Çizelge 4'te verilmiştir.

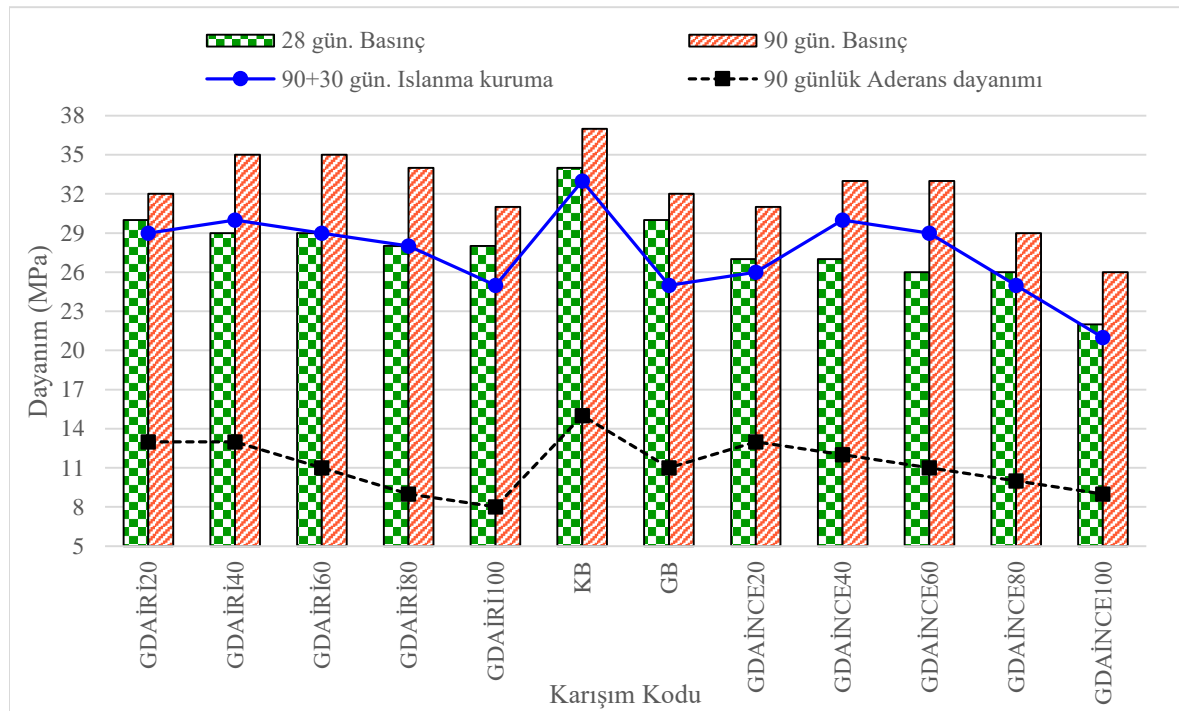
Şekil 3 incelendiğinde karışımlarda en yüksek çökmeyi KB karışımı ve en düşük çökmeyi GB vermiştir. KB kodlu betonun çökme değeri 8,5 cm iken, GB kodlu betonun çökme değeri 5 cm'dir. Bu sonuçlara göre iki karışım arasında 3,5 cm'lik bir çökme farkı vardır. GDA ince agrega yerine kullanılan karışımlar iri agrega yerine kullanılan karışımlarla aynı çökme değerini göstermiştir. GDA oranı arttıkça çökmenin azaldığı görülmektedir. GDA'lı karışımlarda su gereksinimi daha fazladır. Bunun GDA'daki eski harcım su emme oranının fazla olduğundan kaynaklandığını rahatça söyleyebiliriz.

Betonun basınç dayanımı testi 28 ve 90 günlük numuneler üzerinde yapılmış ve sonuçlar MPa olarak Şekil 4'te, kontrol betonu (KB)'a göre yüzdelik değerleri ise Çizelge 5'te verilmiştir.

Şekil 4 incelendiğinde KB betonu bütün yaşlarda en yüksek dayanımı vermiştir. GB kodlu beton 28 ve 90 günlük yaşlarda KB'dan sonra ikinci sırada yer almaktadır. GB ile KB karışımlarının 28 ve 90 günlük

**Çizelge 5.** Betonların basınç dayanımı, ıslanma kuruma ve donatı aderanslarının KB'a göre yüzdelik değerleri (Percentage values of compressive strength, wetting and drying and bond strength of concretes according to CC)

Karışım kodu	Basınç dayanımı		90+30 günlük Islanma kuruma (%)	90 günlük Aderans dayanımı (%)
	28 günlük (%)	90 günlük (%)		
GDAİRİ20	88	86	88	87
GDAİRİ40	86	95	91	87
GDAİRİ60	84	95	88	73
GDAİRİ80	83	92	85	60
GDAİRİ100	82	84	76	53
KB	100	100	100	100
GB	88	86	76	73
GDAİNCE20	79	84	79	87
GDAİNCE40	79	89	91	80
GDAİNCE60	77	89	88	73
GDAİNCE80	76	78	75	67
GDAİNCE100	66	70	64	60

**Şekil 4.** Betonların basınç dayanımları, ıslanma kuruma ve aderans dayanımları (Compressive strength, wetting and drying and bond strength of concretes)

basınç dayanımları karşılaştırıldığında 4 MPa'lık bir fark söz konusudur.

GDAİRİ ile üretilen betonların 28 günlük basınç dayanımları iri oranı arttıkça azalmaktadır. GDAİRİ20 karışımıyla üretilen betonun basınç dayanımı 30 MPa ile bu grup içinde en yüksek dayanımı verirken GDAİRİ100 karışımı 28 MPa ile en düşük dayanımı sağlamıştır. Aynı betonların 90 günlük basınç dayanımlarına bakıldığında 28 güne göre belirli bir artış görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı 35 MPa ile GDAİRİ40 ve GDAİRİ60

karışımları verirken en düşük dayanımı 31 MPa ile GDAİRİ100 vermiştir.

GDAİNCE ile üretilen betonların 28 günlük basınç dayanımları ince oranı arttıkça azalmaktadır. Bu betonların arasında en yüksek dayanımı GDAİNCE20 karışımı 27 MPa ile verirken en düşük dayanımı GDAİNCE100 karışımı 22 MPa ile sağlamıştır. En düşük basınç dayanımı ile en yüksek basınç dayanımı arasında 5 MPa'lık fark söz konusudur. Aynı betonların 90 günlük basınç dayanımları ile 28 günlük basınç dayanımları



karşılaştırıldığında yaşa göre belirli artış görülmektedir. Bu artış ortalama olarak 5 MPa civarındadır. En yüksek basınç dayanımı 33 MPa ile GDAİNCE40 ve GDAİNCE60 karışımları verirken en düşük dayanımı 26 MPa ile GDAİNCE100 vermiştir. Bütün karışımların basınç dayanımları incelendiğinde GDAİRİ ile üretilen betonların daha avantajlı olduğu söylenebilir. Karışımlarda hem ince hem de iri GDA %40 ve %60 oranlarında kullanıldığında betona en yüksek dayanımı kazandırmıştır. Bütün yaşlarda GDA kullanılan bütün karışımların basınç dayanımında düşüş gözlemlenmiştir.



**Şekil 5.** Donatı aderans deneyi sonucu parçalanmış beton numunesi ve donatının koptuğu beton yüzeyleri (Separated concrete specimen after bond strength test and concrete surfaces which rebars broke off from)

90 gün sonra ıslanma kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımı ile ıslanma kuruma yapılmayan numunelerin 90 günlük basınç dayanımı Çizelge 5'te verilmiştir. Çizelge 5 incelendiğinde KB kodlu betonun 90 günlük ıslanma kuruma sonunda en yüksek dayanımı verdiği ve en düşük dayanım kaybının bu betonlarda olduğu görülmektedir.

GDAİRİ ile üretilen betonların 90 gün sonra ıslanma kuruma çevrimlerine tabi tutulduktan sonraki basınç dayanımları aynı agregayla üretilen normal betonların 90 günlük basınç dayanımlarıyla paralellik göstermektedir. Bu grup içinde GDAİRİ40 normal betonlarda en yüksek dayanımı verdiği gibi ıslanma kuruma çevrimlerinden sonra da en az dayanım kaybına maruz kalmıştır. En fazla dayanım kaybı %24 ile GDAİRİ100 karışımında gözlenirken en düşük dayanım kaybı %9 ile GDAİRİ40 karışımında gözlenmiştir.

GDAİNCE ile üretilen betonların 90 gün sonra ıslanma kuruma çevrimlerine tabi tutulduktan sonraki basınç dayanımları aynı agregayla üretilen normal betonların 90 günlük basınç dayanımlarıyla paralellik göstermektedir. Bu grup içinde GDAİNCE40 normal betonlarda en yüksek dayanımı verdiği gibi ıslanma kuruma çevrimlerinden sonra da en yüksek dayanımı kazanmıştır. En fazla dayanım kaybı %36 ile GDAİNCE100 karışımında gözlenirken en düşük dayanım kaybı %9 ile GDAİNCE40 karışımında gözlenmiştir. 90 günlük ıslanma kuruma sonuçları incelendiğinde karışımlarda GDA oranı arttıkça basınç dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir. ıslanma kuruma çevrimleri en çok GDAİNCE100 kodlu betonu etkilemiş ve %36'lık bir dayanım kaybına neden olmuştur.

Donatı aderans deneyi sonucu elde edilen tüm karışımların sıyırılma kuvvetleri Denklem 1 yardımıyla aderans dayanımına dönüştürülmüş ve Şekil 4'te

verilmiştir. Ayrıca kontrol betonu (KB)'a göre yüzdelik değerleri Çizelge 5'te verilmiştir.

$$\tau = \frac{F_u}{\pi \times \varphi \times l} \quad (1)$$

Beton numunelerinin çekme dayanımı aderans dayanımından daha az olduğu için numunelerinin hepsinde donatının sıyırılması yerine beton iki veya üç parçaya bölünerek donatı betondan ayrılmıştır. Bazı numunelerde donatı bölünen beton parçalarının birine yapışmış halde deney son bulmuştur. Şekil 5'te Deney sonucu parçalanmış bir beton numunesi görülmektedir.

Şekil 4 incelendiğinde GDA'nın ince veya iri olduğuna bakmadan GDA oranı arttıkça aderans dayanımı düşmüştür. İri GDA'nın gözenekleri çimento hamuruyla dolarken ince GDA betondaki boşlukları doldurmaktadır. Böylece betonla donatı arasında daha fazla aderans sağlanmaktadır. Buna rağmen GDA'nın KTA'ndan daha az dayanıma sahip olduğundan GDA'lı betonların aderans dayanımları KB kodlu betonunkinden daha az çıkmıştır. Bütün oranlarda GDAİNCE ile üretilen betonların aderans dayanımları GDAİRİ ile üretilen betonlarınkinden daha fazla olduğu gözlenmiştir. GDAİNCE20 betonu 13 MPa ile en yüksek aderans dayanımını verirken GDAİRİ100 betonu 9 MPa ile en yüksek aderans dayanımını sağlamıştır. GB kodlu betonun aderans dayanımı sadece ince veya iri GDA %20 ve %40 oranında kullanılarak üretilen betonların aderans dayanımından daha düşük olduğu görülmüştür.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Geri dönüşüm agregasının su emme oranı aynı boyuttaki KTA'a göre çok daha yüksek değer verirken yoğunluğu daha az olmaktadır. Bu sonuç GDA yüzeyinin daha fazla pürüzlülüğü ile boşluklu yapıda olması ve ayrıca bünyesindeki çimento hamurunun fazla su emmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

GDA'sı KTA'sına göre daha yüksek su emme oranına sahip olmasından dolayı GDA ikame oranı arttıkça çökme değeri azalmıştır.

GDA'nın KTA'sına göre daha düşük yoğunluğa sahip olmasından dolayı GDA ikame oranı arttıkça taze betonun birim hacim ağırlığı azalmıştır.

KB kodlu beton bütün yaşlarda en yüksek dayanımı vermiş ve GDA ikame edildiğinde basınç dayanımında düşüş gözlenmiştir.

28 günlük basınç dayanımlarına bakıldığında, GDA oranı arttıkça dayanım azalmıştır. En yüksek dayanımı KB kodlu beton vermiştir.

90 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, %40 ve %60 oranlarında ince veya iri GDA kullanıldığında en yüksek değerleri verirken %100 oranında kullanıldığında kendi gruplarında en düşük basınç dayanımını vermiştir. GB kodlu beton GDA'lı betonların içinde ortalama bir dayanım kazanmıştır.

Tüm karışımlarda 90 günlük basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımlarıyla paralellik göstermiş ve

%20 oranında uçucu kül kullanılması dayanımların daha da yüksek çıkmasına neden olmuştur.

Bütün karışımların 90 günlük ıslanma kuruma sonrası basınç dayanımlarının normal 90 günlük basınç dayanımlarına göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Geri dönüşüm agreganın su emmesi fazla olduğundan GDA oranı arttıkça betonlar ıslanma kuruma deneyinden daha fazla etkilenmiştir. En az dayanım kaybı KB kodlu betonda ve en yüksek dayanım kaybı GDAİNCE100 kodlu betonda gözlemlenmiştir.

Donatı aderans sonuçları incelendiğinde GDA oranı arttıkça aderans dayanımı düşmüştür. GDA'lı betonlar içinde GB kodlu betonun ortalama bir aderans dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Atık betonların geri dönüşüm agregası olarak betonda kullanılması çevre kirliliğini azalttığı gibi atık malzemeye ekonomik bir değer kazandırmış olacaktır.

#### SİMGELER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

Bu çalışmada kullanılan simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
KTA	Kırmataş agregası
GDA	Geri dönüşüm agregası
KB	%100 KTA ile üretilen beton (Kontrol betonu)
GB	%100 GDA ile üretilen beton
GDAİNCE20	% 20 ince GDA ikameli beton
GDAİNCE40	% 40 ince GDA ikameli beton
GDAİNCE60	% 60 ince GDA ikameli beton
GDAİNCE80	% 80 ince GDA ikameli beton
GDAİNCE100	% 100 ince GDA ikameli beton
GDAİRİ20	% 20 iri GDA ikameli beton
GDAİRİ40	% 40 iri GDA ikameli beton
GDAİRİ60	% 60 iri GDA ikameli beton
GDAİRİ80	% 80 iri GDA ikameli beton
GDAİRİ100	% 100 iri GDA ikameli beton
GDAİRİ	İri GDA ikameli beton
GDAİNCE	İnce GDA ikameli beton
RCA	Recycled concrete aggregates
CSA	Crushed stone aggregate
CC	Concrete produced with 100% CSA (Control concrete)
S/Ç	Su/çimento
BHA	Birim Hacim Ağırlık

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Mehta, K. P. "Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development", *Concrete International*, 24: 23-28, (2002).
- [2] Erdoğan, T. "Beton (1. Baskı)", *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.*, Ankara, (2003).
- [3] Neville, A.M. "Properties of Concrete (Third Edition)", *Longman Scientific and Technical*, New York, (2000).
- [4] Postacıoğlu, B. "Beton bağlayıcı maddeler, Agregalar, Beton", Cilt 2, *Teknik Kitaplar Yayınevi*, İstanbul, (1987).
- [5] Öztürk, M. "İnşaat/Yıkıntı Atıkları Yönetimi", *Çevre ve Orman Bakanlığı*, Ankara, (2005).
- [6] Chandra, S. "Implications of using recycled construction and demolition waste as aggregate in concrete", *Paper presented at International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling*, Kingston University, London, 105-114, (2004).
- [7] Arıoğlu, E., Köylüoğlu, Ö.S. ve Arıoğlu, N. "Dünyadaki geri kazanılmış agrega üretim ve politikalarının gözden geçirilmesi ve ülkemiz açısından irdelenmesi", *1. Ulusal Kırmataş Sempozyumunda sunuldu*, İstanbul, 33-52, (1996).
- [8] Çelik, B. "Recycled Aggregate Concrete at Elevated Temperatures", *Doktora Tezi*, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, (2007).
- [9] Kou, S.C., Poon, C.S. and Chan, D.C. "Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete", *ASCE Journal of Material In Civil Engineering*, 9: 709-715, (2007).
- [10] Katz, A. "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete", *Cement and Concrete Research*, 33(2): 703-711, (2003).
- [11] Köken, A., Köroğlu, M.A ve Yonar, F. "Atık Betonların Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliği", *Selçuk Üniversitesi Teknik-Online Dergi*, 7: 36-48, (2008).
- [12] Brito, J., Ferreira, J., Pacheco, J., Soares, D. and Guerreiro, M. "Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete", *Journal of Building Engineering*, 6: 1-16, (2016).
- [13] Hansen, T.C. and Narud, H. "Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate", *ACI Concrete International, Design and Construction*, 5:79-83, (1983).
- [14] Topcu, B. I. and Guncan, F. N. "Using waste concrete as aggregate", *Cement and Concrete Research*, 25: 1385-1390, (1995).
- [15] Malesev, M., Radonjanin, V. and Marinkovic, S. "Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production", *Sustainability*, 2: 1204-1225, (2010).
- [16] Günçan, N.F. Eski Beton Kırığı Agregalı Betonların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (1995).
- [17] Durmuş, G., Şimşek, O. ve Dayı, M. "Geri dönüşümlü iri agregaların beton özelliklerine etkisi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(1): 183-189, (2008).
- [18] Chen, H.J., Yen T. and Chen K.H. "Use of building rubbles as recycled aggregates", *Cement and Concrete Research*, 33: 125-132, (2003).
- [19] Turanlı, L. "Atık betonların yeni betonda kaba agrega olarak kullanılması", *Hazır Beton*, 61-66, (1998).

- [20] Demirel, C. “Yaşı ve Sınıfı Belli Geri dönüşüm Agregalarının Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2012).
- [21] Tüfekçi, M.M. “Geri Kazanılmış Agregaların Beton Üretiminde Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, (2011).
- [22] Kim, S., Yun, H., Park, W., and Jang, Y. “Bond strength prediction for deformed steel rebar embedded in recycled coarse aggregate concrete”, *Materials & Design*, 83: 257-269, (2015).
- [23] Prince, M.J., and Singh, B. “Bond behavior of deformed steel bars embedded in recycled aggregate concrete”, *Construction and Building Materials*, 49: 852-862, (2013).
- [24] Xiao, J., and Falkner, H. “Bond behavior between recycled aggregate concrete and steel rebars”, *Construction and Building Materials*, 21: 395-401, (2007).
- [25] Guerra, M., Ceia, F., Brito, J. and Júlio, E. “Anchorage of steel rebars to recycled aggregates concrete”, *Construction and Building Materials*, 72: 113-123, (2014).
- [26] Yılmaz, Ş. “Seyitömer Termik Santrali Atık Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 45-66, (1992).
- [27] Şimşek, O. “Beton ve Beton Teknolojisi (5. baskı)”, *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, 46-109, (2016).
- [28] ASTM C 618. “Standart Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete”, (1998).
- [29] Atış, C., Kılıç A. and Sevim U.K. “Strength and shrinkage properties of mortar containing a nonstandard high-calcium fly ash”. *Cement and Concrete Research*, 34, 99-102, 2004.
- [30] Baradan, B. “Yapı Malzemesi II”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları*, İzmir, (1996).
- [31] Wang, K., Shah S.P. and Phuaksuk P. “Plastic shrinkage cracking in concrete materials- Influence of fly ash and fibers”. *ACI Materials Journal*, 6: 458-464, (2001).
- [32] Lee, H. K., Lee K.M., Kim B.G. “Autogenous shrinkage of high-performance concrete containing fly ash”. *Magazine of Concrete Research*, 55 (6): 507-515, (2003).
- [33] Öner, A., Direr, S. ve Sevgül, T. “İslenme Kuruma Çevrimi - Dinamik Elastisite Modülü İlişkisi”, *İzmit : Kocaeli Üniversitesi*, (2014).
- [34] TS EN 934-2+A1. “Kimyasal katkılar - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme”, (2012).
- [35] TS EN 933-1. “Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi”, (2015).
- [36] TS EN 1097-6. “Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini”, (2015).
- [37] TS EN 933-3. “Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 3: Tane şekli tayini - Yassılık endeksi”, (2015).
- [38] TS EN 1097-2. “Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 2 : Parçalanma direncinin tayini için yöntemler”, (2015).
- [39] TS 802. “Beton karışım tasarımı hesap esasları”, (2016).
- [40] TS EN 12350-6. “Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk”, (2016).
- [41] TS EN 12350-2. “Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi”, (2010).
- [42] TS EN 12390-3. “Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini”, (2010).
- [43] RILEM/CEB/FIP, “Recommendations on reinforcement steel for reinforced concrete. Revised edition of RC6 of bond test for reinforcement steel: (2) Pull-out test”, (1983).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

## Kok fırını gazı ve jeneratör gazının oksijence zenginleştirilmiş yanması: Sayısal bir çalışma

### *Oxygen enriched combustion of coke oven gas and generator gas: A numerical study*

*Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa ILBAS<sup>1</sup>, Esat YANIK<sup>2</sup>, Serhat KARYEYEN<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-6668-1484*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-9312-8921*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-8383-5518*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Ilbas M., Yanık E. ve Karyeyen S., “Kok fırını gazı ve jeneratör gazının oksijence zenginleştirilmiş yanması: Sayısal bir çalışma”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 93-100, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.385918

# Kok Fırını Gazı ve Jeneratör Gazının Oksijence Zenginleştirilmiş Yanması: Sayısal Bir Çalışma

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Mustafa ILBAS<sup>1</sup>, Esat YANIK<sup>2</sup>, Serhat KARYEYEN<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 06.01.2017 ; Kabul/Accepted : 14.02.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada, kok fırını ve jeneratör gazları, hava ve farklı oranlardaki oksijence zenginleştirilmiş hava şartlarında yakılmış ve havanın içerisinde bulunan oksijen miktarının yanma ve emisyon parametrelerine olan etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Sayısal çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımda, PDF/karışım oranı yanma modeli ile yanma modellenmiş, bu modelleme için standard k-ε türbülans modeli ile P-1 radyasyon modelleri kullanılmıştır. Havanın bünyesinde hacimce % 21 seviyelerinde bulunan O<sub>2</sub> miktarı artırılarak, % 30, % 40 ve % 50'ye çıkarılmıştır. Yapılan tahmin sonuçları değerlendirildiğinde, her iki gazın yanma şartları için de, oksijence zenginleştirilmiş yanma ile birlikte, alev sıcaklıklarının yükseldiği rahatlıkla söylenebilir. Böylece oksijence zenginleştirilmiş yanma ile kok fırını gazı ve jeneratör gazının yanma performanslarının arttığı görülmüştür. Sonuçlar, emisyon bakımından değerlendirecek olursak, hava, oksijence zenginleştirildikçe, yanma sonu CO emisyonlarının azaldığı, CO<sub>2</sub> emisyonlarının da arttığı belirlenmiştir. Son olarak, NOX emisyonları da araştırılmış ve havada bulunan oksijen miktarı arttırıldıkça alev sıcaklıklarının yükselmesine bağlı olarak NOX emisyonlarında da artış olduğu saptanmıştır. Hacimce % 50 O<sub>2</sub> içeren hava şartları için gerçekleştirilen yanma neticesinde en yüksek sıcaklık seviyeleri 2200 K'lere ulaşırken en yüksek NOX seviyeleri de 1500 ppm dolaylarına yükselmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Oksijence zenginleştirilmiş yanma, hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellemesi, emisyon, sentetik yakıt.

# Oxygen Enriched Combustion of Coke Oven Gas and Generator Gas: A Numerical Study

## ABSTRACT

The amount of oxygen in air has been changed and the effect of oxygen amount has been numerically investigated on combustion and emission parameters of coke oven and generator gases in a model combustor. A CFD code has been used to perform numerical analysis. Combustion has been modelled by using the PDF/Mixture Fraction combustion model, standard k-ε turbulence model as turbulence model and P-1 radiation model as radiation model. The amount of oxygen in the air has been changed from 21 % to 30 %, 40 % and 50 %. According to the predictions, it can be readily said that the flame temperatures of the coke oven and the town gases increases under oxygen-enriched combustion conditions. Therefore, it is demonstrated that the combustion performances of the coke oven and town gases have been improved under oxygen-enriched combustion. When the results are evaluated in terms of emissions, it has been determined that CO emissions decrease while CO<sub>2</sub> emissions increase as the air is enriched with oxygen. It has been also concluded that NOX emission levels increase under oxygen-enriched combustion conditions due to increases in flame temperatures of the coke oven and the town gases. The maximum flame temperature level has been predicted as of almost 2200 K under % O<sub>2</sub>-included air conditions just as the maximum NOX level has been also predicted as about 1500 ppm under the same conditions.

**Keywords:** Oxygen-enriched combustion, CFD modelling, combustion, synthetic gas

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, alternatif enerji kaynaklarına olan eğilim artıyor olsa bile enerji kaynağı olarak fosil yakıtlar hala önemli bir yere sahip olmaya devam etmektedir. Bilinen fosil yakıt türleri kömür, petrol ve doğalgaz olup bunlardan kömür ülkemiz için daha bol bulunabilen yerli bir kaynak iken petrol ve doğalgaz, kömüre göre daha fazla ithal edilmektedir. Bu yüzden kömürün kullanımını yaygınlaştırmak, ülkemizin dışa olan bağımlılığını

azaltmada önemli bir yere sahiptir. Ancak kömür, ihtiva ettiği elementler nedeniyle yandığı zaman çevreyi aşırı kirletmekte ve ısı değerinin çok yüksek olmamasından dolayı da diğer fosil yakıtlara nazaran ciddi bir enerji kaynağı olamamaktadır. Kömüre ilişkin bahsedilebilecek diğer bir olumsuz özellik de katı yakıt olması ve yakma teknolojilerinin oldukça zor olmasıdır. Tüm bu nedenler dikkate alındığında, kömürleri gazlaştırmak ya da koklaştırma yapılırken açığa çıkan gaz karışımlarını değerlendirmek oldukça önem arz etmektedir.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : serhatkaryeyen@gazi.edu.tr

Kömürler, farklı sıcaklık ve basınçlarda ve farklı tip reaktörlerde gazlaştırma işlemine tabi tutulurlar. Kömürlerin gazlaştırılma işleminde eğer hava kullanılırsa, gazlaştırma sonucunda elde edilecek sentetik yakıt jeneratör gazı olarak bilinir ve yüksek oranda azot içerir. Koklaştırma işlemi ile sentetik yakıt elde edilmek istenirse, koklaştırma yan ürünü olarak açığa çıkan kok fırını gazı değerlendirilmelidir. Bu gaz, yüksek oranda hidrojen içermesinin yanı sıra yanabilir bileşen olarak metan da bulundurmasından dolayı ısı değer bakımından oldukça iyi durumdadır. Dolayısıyla bu sentetik yakıtlar, gaz yakıt olarak kullanılabilen ve doğalgaza alternatif teşkil edebilmektedirler. Ancak yine de, ısı değer bakımından doğalgazın uzağında olmaları, yanma performanslarının daha düşük olmasına neden olmaktadır [1]. Bahsi geçen bu sentetik yakıtlar, oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları ile yakıldığında ise durumun farklı olacağı düşünülmektedir. Çünkü havanın bünyesinde bulunan yüksek miktardaki N<sub>2</sub>, yanma sonu açığa çıkan ısı enerjisinin bir bölümünü absorbe etmektedir. Bu miktarın azaltılması ile bu yakıtların yanma performansları artırılmış olacaktır. Aşağıda bu konuya ilişkin daha önce yapılmış bazı çalışmalar sunulmuştur.

Bordbar ve ark. fosil yakıtlı cam eritme tanklarında oksijence zenginleştirilmiş yanmayı analiz ederek gerçekleştirmiştir. Cam eritme tanklarında oksijence zenginleştirilmiş yanmanın enerji analizi, azalan yakıt girdisini de dikkate alarak, yanma ürünleri ve azot miktarında ki düşüşe bağlı olarak atık gazlar tarafından taşınan ısı miktarında da belirgin bir azalma olduğunu ortaya çıkarmıştır. [2]. Normann ve ark. yaptıkları bir çalışmada oksî-yakıt yanmada azot oksitlerin (NO<sub>x</sub>) yüksek sıcaklıktaki azaltılma ihtimali incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, saf oksijen kullanılmış ve yanma sonu NO<sub>x</sub> emisyonunun ana kaynağı havadaki N<sub>2</sub> olmadığından yanma sonu NO<sub>x</sub> emisyonunun azaltılması başarılıdır [3]. Kez ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada ise 20 atm basınç altında, 2 farklı durum için, farklı gri olmayan radyasyon modellerinin etkileri oksijence zengin yanma şartları için araştırılmıştır [4]. Li ve ark. oksî-yakıt yanmasında, saflaştırma prosesine kirleticilerin etkilerini araştırmışlardır [5]. Sonuçlar, kirleticilerin artması ile saflaştırma için gerekli enerji tüketiminin arttığını göstermektedir. Buhre ve ark., kömür yakan sistemlerde oksî-yakıt kullanılmasına dair bir literatür çalışması gerçekleştirmişler ve böylece kömürün oksî-yakıt yanma şartlarına ilişkin detaylı bir analiz sunmuşlardır [6]. Benzer şekilde, Toftegaard ve ark., katı yakıtların oksî-yakıt şartlarında yakılması ile ilgili genel bir literatür taraması gerçekleştirmişlerdir [7]. Zannis ve Hountalas, dizel bir motorun yanma ve emisyon parametrelerini oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, oksijence zenginleştirme yapıldığında yanmanın daha erken başladığı ve en yüksek yanma basıncında bir miktar artış olduğu saptanmıştır [8]. Ditaranto ve Hals, ani genişlemeli bir sistemde oksijence zenginleştirilmiş

yanma şartları ile metanı yakmışlar ve yanma kararsızlıklarını araştırmışlardır. Yapılan çalışmaya göre, yanma kararsızlıklarının oksijen konsantrasyonuna ve Reynolds sayısına bağlı olduğu belirlenmiştir [9]. Chen ve ark. pülverize kömürün oksî-yakıt yanma şartları için, karakterizasyon, stabilizasyon ve modellemeye dair genel bir literatür çalışması gerçekleştirmişlerdir [10]. Yoshiie ve ark. oksî-yakıt yanma şartlarında, kömürün yanması sonucu ortaya çıkan NO<sub>x</sub> emisyonlarına, baca gazı yeniden dolaşımının ve azot miktarının etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlara bakıldığında, resirküle edilen NO<sub>x</sub>'un NO<sub>x</sub> emisyonlarına olan katkısının oldukça az olduğu görülmektedir [11].

Yukarıda bahsi geçen çalışmalar değerlendirildiğinde, oksî-yakıt yanma şartları için daha çok katı ve sıvı yakıtlara yönelik araştırmalar yapıldığı, gaz yakıtlara yönelik yapılan araştırmaların da daha çok bilinen yakıtları kapsadığı anlaşılmaktadır. Özellikle kok fırını gazı ve jeneratör gazı gibi kömür gazlarının oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için gerçekleştirilmiş önemli bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada, bu iki gazın oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için yanma ve emisyon parametreleri sayısal olarak araştırılmıştır.

## 2. MODELLEME ÇALIŞMALARI (MODELLING STUDIES)

Eksenel simetrik bir akış için silindirik koordinatlarda genel form aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial x} + \text{div}(\rho\Phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S_{\Phi} \quad (1)$$

Burada  $\Phi$  bağımlı değişkenleri temsil etmekte  $\Gamma$  ise  $\Phi$  için taşıyıcı eşitliğinin kaynak terimini ifade eden  $S_{\Phi}$  ve  $\Phi$  değişkenleri için taşıyıcı sabiti göstermektedir [12].

Çalışmada kullanılan PDF/karışım oranı yanma modeli skaler korunumlu tek bir karışım için taşıyıcı eşitliklerin çözümlerinden meydana gelir [13]. Bu yanma modelinde ayrı ayrı türler için taşıyıcı eşitlikler çözülmez. Onun yerine, ilgili tür için tek tek bileşim konsantrasyonu, karışım oran dağılımı tahmin edilen formda türetilmiştir. Kimya ve türbülansın etkileşimi, imkan dahilindeki yoğunluk fonksiyonunun yardımı ile açıklanabilir [13].

PDF model yaklaşımı türbülanslı difüzyon alevlerinin simülasyonu için özel olarak geliştirilmiştir. Yakıt/Oksitleyici bir sistem için, karışım oranı, yerel yakıt kütle oranı bakımından şöyle yazılabilir [13]:

$$f = \frac{m_F}{m_F + m_O} \quad (2)$$

Burada  $m_F$  ve  $m_O$ , yakıt ve havanın kütle oranlarını göstermektedir. Karışım oranı,  $f$ , türbülanslı akış alanının zaman ortalamalı değeri için korunum denklemlerinin çözüldüğü akış alanındaki her noktada korunan bir nicelik değeridir [13].

$$\frac{\partial(\rho\bar{f})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \bar{f})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} \right) + S_m \quad (3)$$

Burada  $S_m$ , sıvı yakıt damlacığından gaz fazına, yalnızca zamanı gelmiş kütle transferinin kaynak terimidir.

Ortalama karışım oranı için çözüme ek olarak, bir korunum denklemi karışım oranı değişimi için çözümler.  $\overline{f'^2}$ , türbülans-kimya etkileşimini tanımlayan kapama modelinde kullanılır [13].

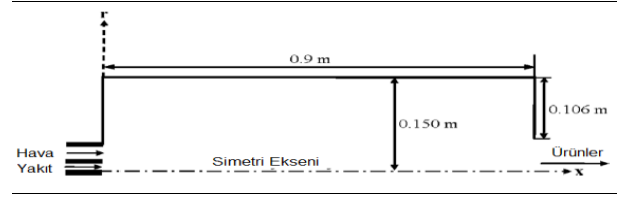
$$\frac{\partial(\rho \overline{f'^2})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \overline{f'^2})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \overline{f'^2}}{\partial x_i} \right) + C_g \mu_t \left( \frac{\partial \overline{f'^2}}{\partial x_i} \right)^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2} \quad (4)$$

burada  $\sigma_t$ ,  $C_g$  ve  $C_d$  Mixture Fraction/PDF modelinde kullanılan sabitlerdir.

Radyasyonla ısı transferi yüksek sıcaklıklarda meydana gelmektedir. Yanma odalarındaki gaz alevi sıcaklığı, özellikle de stokiyometrik yanma şartlarında 1000-1600 °C'nin üzerine çıkmaktadır. Bunun sonucunda girdaplı yanma odalarından olan ısı transferi belirlidir. Sonuç olarak, yanma odalarındaki sıcaklık dağılımlarını daha iyi belirleyebilmek için radyasyon modelini kullanmaya ihtiyaç vardır [13].

Gaz karışımli yakıtların yakılmasında kullanılan matematiksel modelleme bazı öngörüler üzerine gerçekleştirilmektedir. Akış, kararlı durumda değerlendirilmekte olup, 2-D aksel simetrik

referans alınmış olup, bahsi geçen çalışmadaki yanma odasına ait özellikler Şekil 1'de gösterilmiş, bu yanma odasının ölçüleri ise Çizelge 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Yanma odası (The combustor)

Çalışmanın yanma şartları 20 kW ısı güç ve 0.83 eşdeğerlilik oranında olacak şekilde belirlenmiş, hava ve yakıtın sıcaklıkları 293 K olarak alınmıştır. Modellemeler, öncelikle % 21 O<sub>2</sub> içeren hava ile gerçekleştirilmiş, ardından havanın içerisindeki O<sub>2</sub> seviyesi hacimce % 30, % 40 ve % 50 olacak şekilde artırılmış ve modellemeler tekrarlanarak oksijence zenginleştirilmiş yanmanın sayısal modellemeleri yapılmıştır. Modellemelerde kullanılan yakıtlar ise yüksek ve düşük kalorili kok fırını gazı ve jeneratör gazı olup bunlara ait özellikler de Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Yanma Odasının Özellikleri (Properties of the combustor)

Yakıt Girişi	r=0 mm'den	r=6 mm'ye
Hava Girişi	r=16,5 mm'den	r=27,5 mm'ye
Yanma Odası Çapı	150 mm	
Yanma Odası Uzunluğu	900 mm	

Çizelge 2. Kullanılan Kömür Gazlarının Özellikleri (Properties of the coal gases used)

	%	%	%	%	%	Alt Isıl Değer (kcal/m <sup>3</sup> )	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>		
Kok Fırını Gazı	55	27	6	2	10	3678	0,45
Jeneratör Gazı	12	0,5	28	5	54,5	1124	1,07

çözümleme yapılmış, süreklilik, momentum, enerji ve türlerin korunumu öngörülmüştür. Çalışmada k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Yanma modeli olarak önkarişimsiz yanma modellerinden PDF/karışım oranı yanma modeli tercih edilmiştir. Ayrıca çalışmada radyasyon modeli de kullanılarak çözüme gidilmiş ve burada literatürde yapılan başka çalışmalar da göz önüne alınarak P-1 radyasyon modeli tercih edilmiştir [13].

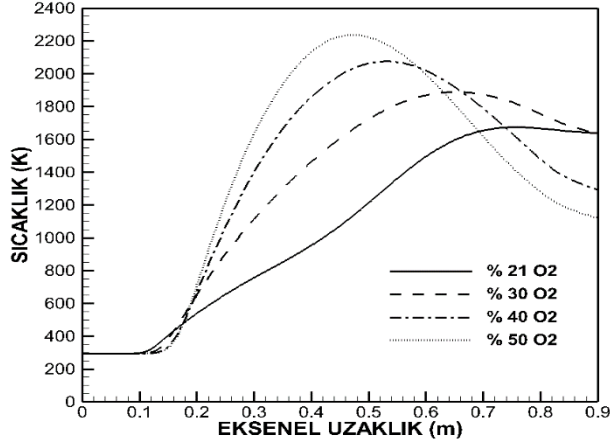
### 2.1. Kullanılan Yanma Odası ve Özellikleri (Combustor used in this study and its properties)

Bu çalışma kapsamında, oksijence zenginleştirilmiş yanmanın gerçekleştirilmesinde Yılmaz [14] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada kullanılan yanma odası

### 3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

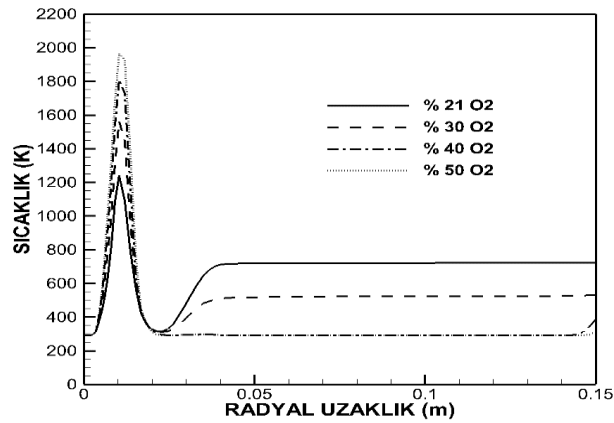
Kok fırını gazı ve jeneratör gazı yanmasında kullanılan havanın, farklı oranlardaki oksijen ile zenginleştirilmesinin yanma ve emisyon parametrelerine etkileri çalışmanın bu bölümünde sunulmuştur. Şekil 2'de kok fırını gazı için oksijence zenginleştirilmiş yanma sonucu elde edilen aksel sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil 2'den de anlaşılacağı gibi, havanın içerisindeki oksijen miktarı arttırıldıkça alev sıcaklığı yükselmiş ve % 50 O<sub>2</sub> içeren hava ile gerçekleştirilen yanmada en yüksek alev sıcaklığı seviyesine yaklaşık 2200 K ile ulaşmıştır.

Ayrıca, havanın bünyesindeki oksijen miktarı arttırıldıkça, kok fırını gazının yüksek sıcaklık bölgeleri, yanma odası çıkışından yanma odasının ortalarına doğru hareket etmiştir. Bunun temel nedeninin oksijenin yanmayı hızlandırması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 2. Oksijence zenginleştirilmiş yanmada kok fırını gazı için aksel sıcaklık dağılımı (Axial temperature distribution for coke oven gas under oxy-fuel combustion)

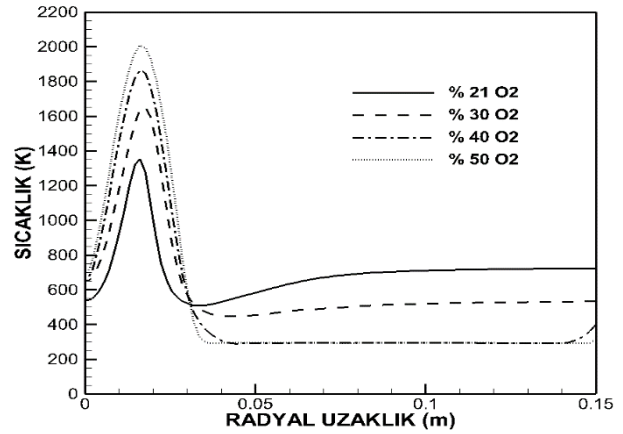
Şekil 3'te ise oksijence zenginleştirilmiş kok fırını gazı için 0,04 m aksel uzaklıktan elde edilen radyal sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Eksenden duvara doğru gidildikçe, oksijence yapılan zenginleştirmenin radyal sıcaklıkları belli bir seviyede yükselttiği, ardından ise düşürdüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 3. Oksijence zenginleştirilmiş yanmada kok fırını gazı için 0,04 m aksel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı (Radial temperature distribution at 0,04 m axial distance for coke oven gas under oxy-fuel combustion)

Benzer durum Şekil 4'te gösterilen ve 0,2 m aksel uzaklıktan elde edilen radyal sıcaklık dağılımlarında da ortaya çıkmaktadır. Yanma odası merkezinden duvarında doğru gidildikçe, öncelikle sıcaklık seviyelerinde önemli derecede artış olmuş, ardından, oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için düşüşler gözlemlenmiştir. Bu durum, kok fırını gazının yüksek

oranda hidrojen içermesi ile açıklanabilir. Hidrojenin reaktivitesi oldukça yüksek olup yoğunluğu da oldukça düşüktür. Ayrıca, yakıtın, yanma odasının merkezinden beslendiği düşünülecek olursa, oksijence zenginleştirilmiş yanma şartlarında meydana gelen yüksek alev sıcaklıklarının da yanma odası merkezinde olması kaçınılmazdır. Üstelik yapılan modellemelerde girdap sayısının da 0 olması nedeni ile havanın herhangi bir şekilde teğetsel hıza maruz kalmaması ve bu nedenle de yanma odası içerisinde fazlaca dağılmaması oldukça normaldir. Yine de buna rağmen yanma sonu ürünlerinin yanma odası içerisinde ilerlemesi neticesinde elde edilen dağılımlara da bakılmalıdır.



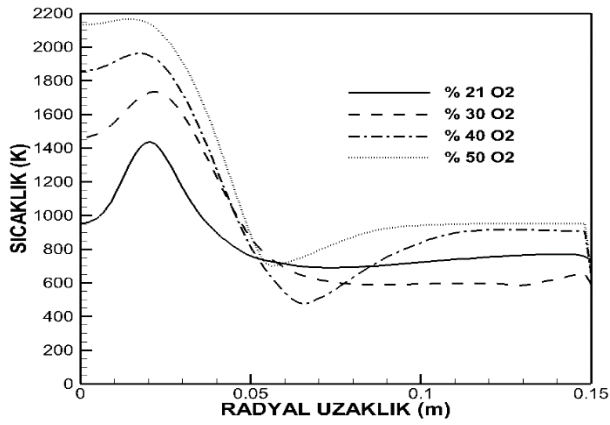
Şekil 4. Oksijence zenginleştirilmiş yanmada kok fırını gazı için 0,2 m aksel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı (Radial temperature distribution at 0,2 m axial distance for coke oven gas under oxy-fuel combustion)

Şekil 5'te gösterilen ve 0,4 m aksel uzaklıktan elde edilen radyal sıcaklık dağılımlarına bakılacak olursa, yanma odasının radyal bölgelerinde de oksijence zenginleştirilmiş yanmanın etkileri daha açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu durum ise, kok fırını gazı alevinin artık yanma odası içerisine daha etkin bir şekilde yayıldığını ve yanmanın neredeyse tamamlandığını göstermektedir. Benzer şekilde Şekil 6'da incelenecek olursa, sıcaklık seviyelerinin oldukça yükseldiği, yanma odası merkezi ile duvarı arasında sıcaklık seviyeleri arasındaki farkların daha da azaldığı rahatlıkla söylenebilir.

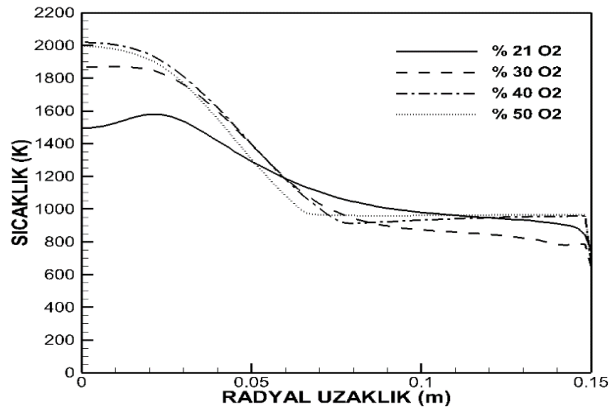
Şekil 7'de oksijence zenginleştirilmiş farklı yanma şartları için yanma odasının merkezinden alınan aksel NOX dağılımları gösterilmiştir. Bilindiği gibi, NOX oluşum mekanizmalarından ısıl NOX oluşum mekanizması oldukça baskın bir mekanizma olup, alev sıcaklığının yükselmesine bağlı olarak üstel olarak NOX seviyelerini arttırmaktadır. Bu çalışmada da, havanın oksijence zenginleştirilmesi neticesinde kok fırını gazının alev sıcaklığı yükselmekte ve buna bağlı olarak NOX seviyelerinde ciddi artışlar meydana gelmektedir. Her ne kadar havanın oksijenle zenginleştirilmesi ile yanma odasına beslenen azot miktarı azalmış olsa da, alev sıcaklığının yükselmesi, bu duruma göre daha baskın bir rol oynamış ve böylece, kok



fırını gazının oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için en yüksek NOx seviyelerini 1500 ppm'lerin üzerine kadar yükseltmiştir.

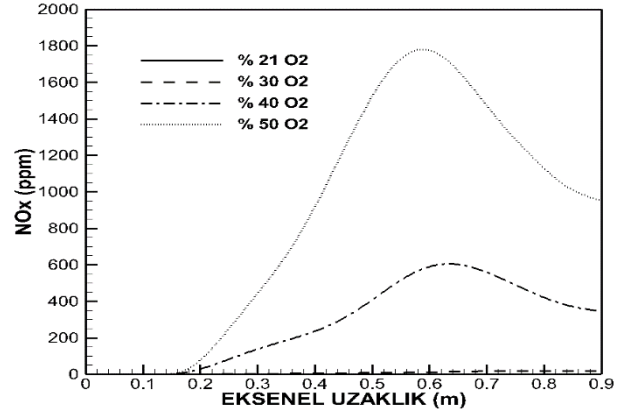


Şekil 5. Oksijence zenginleştirilmiş yanmada kok fırını gazı için 0,4 m eksenel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı (Radial temperature distribution at 0,4 m axial distance for coke oven gas under oxy-fuel combustion)

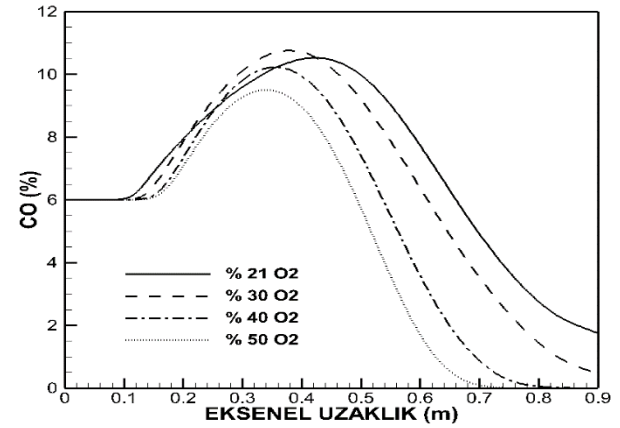


Şekil 6. Oksijence zenginleştirilmiş yanmada kok fırını gazı için 0,6 m eksenel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı (Radial temperature distribution at 0,6 m axial distance for coke oven gas under oxy-fuel combustion)

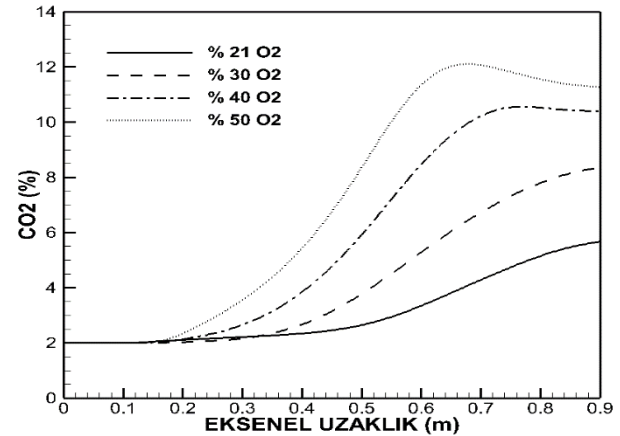
Şekil 8'de ise oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için eksen boyunca kok fırını gazının CO yanma sonu ürünleri verilmiştir. Şekil 8'den de anlaşılacağı gibi, havanın içerisindeki oksijen seviyesi artırıldıkça, yanma sonu CO ürünlerinde bir miktar azalma olmuş ve böylece yanma iyileştirilmiştir. Bu durum, eksenel sıcaklık dağılımlarında da ortaya konulmuştur. Ayrıca kok fırını gazının yakılması için kullanılan havanın bünyesindeki oksijen seviyelerinin artırılması ile en yüksek CO seviyelerinin olduğu bölgeler, yanma odası çıkışına yakın bölgelerden yakıcıya daha yakın bölgelere doğru yaklaşmıştır.



Şekil 7. Oksijence zenginleştirilmiş yanmada kok fırını gazı için eksenel NOx dağılımı (Axial NOx distribution for coke oven gas under oxy-fuel combustion)



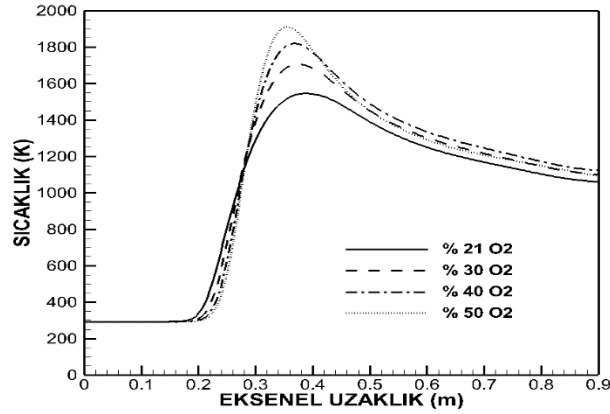
Şekil 8. Oksijence zenginleştirilmiş yanmada kok fırını gazı için eksenel CO dağılımı (Axial CO distribution for coke oven gas under oxy-fuel combustion)



Şekil 9. Oksijence zenginleştirilmiş yanmada kok fırını gazı için eksenel CO2 dağılımı (Axial CO2 distribution for coke oven gas under oxy-fuel combustion)

Şekil 9'da oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için eksen boyunca tahmin edilen kok fırını gazının CO2 yanma sonu ürünleri sunulmuştur. Şekil 9'dan da anlaşılacağı gibi, havanın içerisindeki oksijen seviyesi artırıldıkça, yanma sonu CO2 ürünlerinde önemli

derecede artış gözlemlenmiş ve bu durum da yanmanın iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca kok fırını gazının yakılması için kullanılan havanın bünyesindeki oksijen seviyelerinin artırılması ile en yüksek CO<sub>2</sub> seviyelerinin olduğu bölgeler, yanma odası çıkışına yakın bölgelerden yanma odasının ortasında doğru kaymıştır.

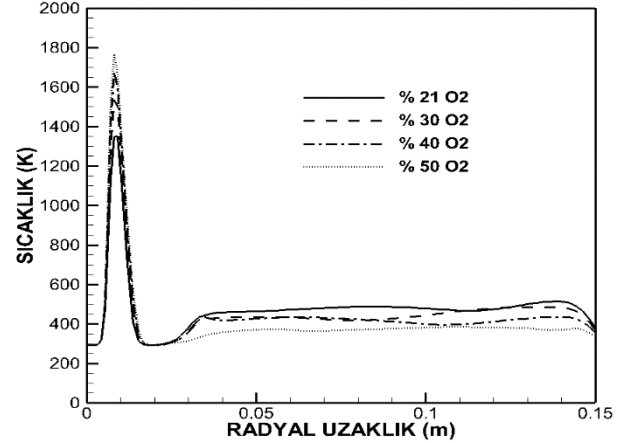


**Şekil 10.** Oksijence zenginleştirilmiş yanmada jeneratör gazı için eksenel sıcaklık dağılımı (Axial temperature distribution for generator gas under oxy-fuel combustion)

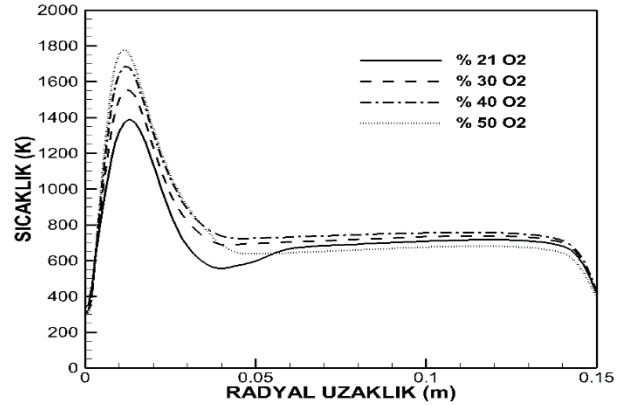
Çalışma kapsamında sayısal modellemesi gerçekleştirilen diğer bir yakıt da jeneratör gazıdır. Jeneratör gazını kok fırını gazından ayıran en önemli özellik yüksek oranda azot içermesi ve buna bağlı olarak da oldukça düşük kalorili bir yakıt olmasıdır. Bu nedenle, bu yakıtın yakılması için kullanılan hava da oksijence zenginleştirilmiş olup, yanma sonucu elde edilen sıcaklık ve emisyon davranışları aşağıda sunulmuştur. Şekil 10'da jeneratör gazının oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için tahmin edilen eksenel sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Şekil 10'dan da anlaşılacağı gibi, havanın bünyesinde bulunan oksijen miktarı artırıldıkça jeneratör gazının alev sıcaklığı yükselmiş ve % 50 O<sub>2</sub> içeren havanın bulunduğu yanma şartları için 2000 K'e yaklaşmıştır. Sonuç olarak, oksijence zenginleştirilmiş yanmanın jeneratör gazının yanma performansını artırdığı rahatlıkla söylenebilir.

Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'te, oksijence zenginleştirilmiş yanma şartlarında jeneratör gazı için tahmin edilen radyal sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Kok fırını gazının radyal sıcaklık dağılımlarında olduğu gibi, jeneratör gazının radyal sıcaklık dağılımlarında da, oksijence zenginleştirme, yanma odasının merkezinden duvarına doğru gidildikçe, sıcaklık seviyelerinin önce artmasına ardından da azalmasına neden olmuştur. Bu durumun nedeni kok fırını gazı için ortaya koyulan gerekçe ile aynıdır. Gerek yakıtın yanma odasına merkezden beslenmesi gerekse havaya yönelik herhangi bir girdap oluşturulmaması bu durumu açıklamaktadır. Yine de buna rağmen yanma odasında ilerledikçe, alevin yanma odasına doğru yayılmasına bağlı olarak bu durum bir miktar değişmekte ve oksijence zenginleştirilmenin

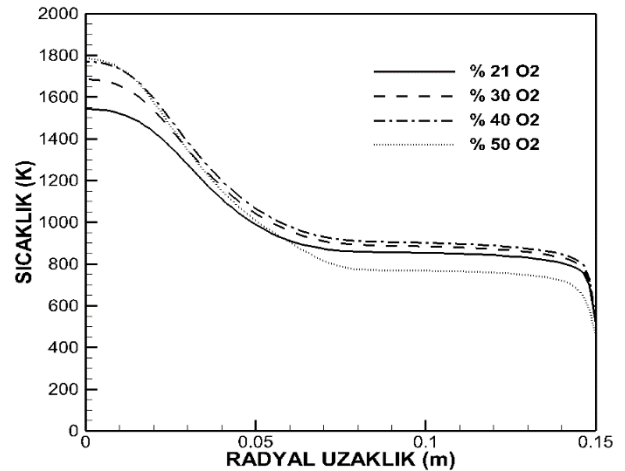
olumlu etkisi radyal sıcaklık dağılımlarında da gözükülmektedir.



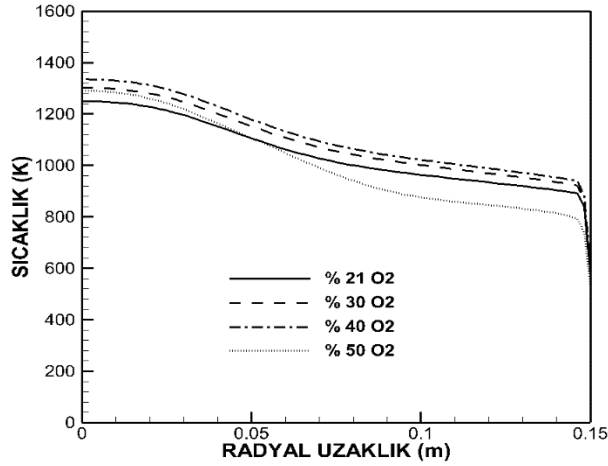
**Şekil 11.** Oksijence zenginleştirilmiş yanmada jeneratör gazı için 0,04 m eksenel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı (Radial temperature distribution at 0,04 m axial distance for generator gas under oxy-fuel combustion)



**Şekil 12.** Oksijence zenginleştirilmiş yanmada jeneratör gazı için 0,2 m eksenel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı (Radial temperature distribution at 0,2 m axial distance for generator gas under oxy-fuel combustion)

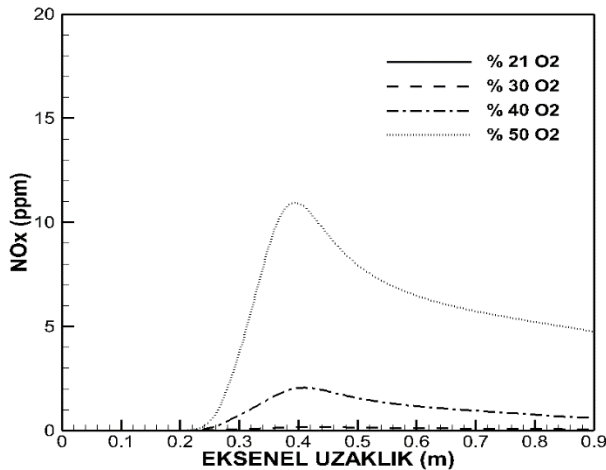


**Şekil 13.** Oksijence zenginleştirilmiş yanmada jeneratör gazı için 0,4 m eksenel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı (Radial temperature distribution at 0,4 m axial distance for generator gas under oxy-fuel combustion)



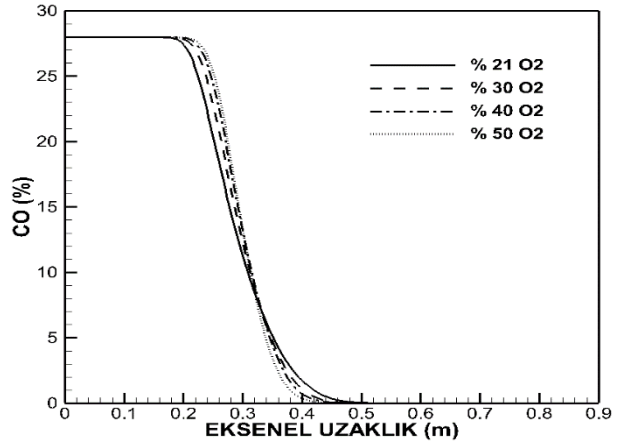
**Şekil 14.** Oksijence zenginleştirilmiş yanmada jeneratör gazı için 0,6 m eksenel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı (Radial temperature distribution at 0,6 m axial distance for generator gas under oxy-fuel combustion)

Şekil 15'te oksijence zenginleştirilmiş farklı yanma şartlarında jeneratör gazı için yanma odasının merkezinden alınan eksenel NOX dağılımları gösterilmiştir. NOX artışının temel nedenine ısıl NOX mekanizmasının oldukça etkili olduğundan bahsedilmiş olup havanın oksijence zenginleştirilmesi neticesinde jeneratör gazının alev sıcaklığındaki artış ile birlikte NOX seviyelerindeki artışlar da rahatlıkla açıklanabilir. Her ne kadar havanın oksijenle zenginleştirilmesi ile yanma odasına beslenen azot miktarı azalmış olsa da, alev sıcaklığının yükselmesi, bu duruma göre daha baskın bir rol oynamış ve böylece, jeneratör gazının oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için en yüksek NOX seviyeleri 10 ppm dolaylarında tahmin edilmiştir. Bu değer, kok fırını gazı için tahmin edilen en yüksek NOX seviyeleri ile karşılaştırıldığında oldukça düşük kalmaktadır.

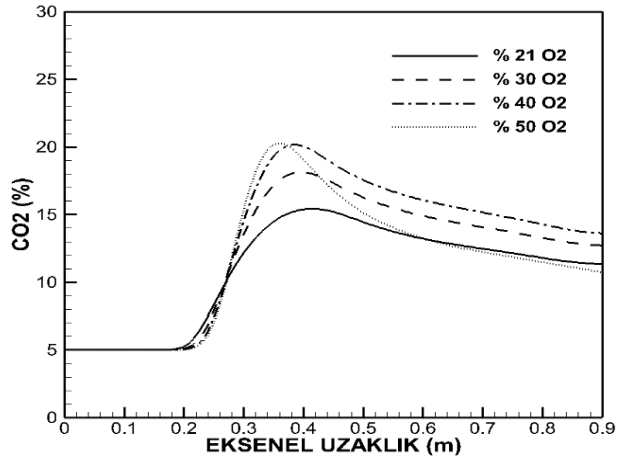


**Şekil 15.** Oksijence zenginleştirilmiş yanmada jeneratör gazı için eksenel NOX dağılımı (Axial NOX distribution for generator gas under oxy-fuel combustion)

Şekil 16'da ise oksijence zenginleştirilmiş yanma şartlarında jeneratör gazının yanması için eksen boyunca tahmin edilen yanma sonu CO ürünleri verilmiştir. Şekil 16'dan da anlaşılacağı gibi havanın içerisindeki oksijen seviyesi arttırıldıkça yanma sonu CO ürünlerinde çok az da olsa azalma gözlemlenmiştir. Bu durum eksenel sıcaklık dağılımlarında da belirtildiği gibi, CO seviyesinin az da olsa değişimi ile yanmanın iyileştirildiği söylenebilir.



**Şekil 16.** Oksijence zenginleştirilmiş yanmada jeneratör gazı için eksenel CO dağılımı (Axial CO distribution for generator gas under oxy-fuel combustion)



**Şekil 17.** Oksijence zenginleştirilmiş yanmada jeneratör gazı için eksenel CO2 dağılımı (Axial CO2 distribution for generator gas under oxy-fuel combustion)

Şekil 17'de ise oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için jeneratör gazının eksenel CO2 tahminleri sunulmuştur. Havanın içerisindeki oksijen miktarının arttırılması ile yanmanın bir miktar iyileştiği ve böylece yanabilir bileşenlerin daha fazlaca CO2'ye dönüştüğü Şekil 17'den anlaşılmaktadır. En yüksek CO2 seviyeleri yüzde 15 seviyelerinden 20 seviyelerine kadar artmıştır.

#### 4.SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, kok fırını gazı ve jeneratör gazının oksijenle zenginleştirilmiş yanma şartları için yanma ve emisyon parametreleri sayısal olarak araştırılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde kok fırını gazı ve jeneratör gazı, % 21, % 30, % 40 ve % 50 O<sub>2</sub> içeren hava şartlarında sayısal olarak yakılmış, oksijenle zenginleştirilmiş her bir yanma şartı için bu gazların sıcaklık ve emisyon dağılımları elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Yapılan sayısal modellemeler neticesinde elde edilen bazı sonuçlar şöyledir:

- Oksijenle zenginleştirilmiş yanma şartlarında yakılan her iki yakıt için de, havanın içerisindeki O<sub>2</sub> miktarı arttırıldıkça alev sıcaklıklarının yükseldiği tespit edilmiştir. Ancak, yine de buna rağmen, yanma odası girişine yakın radyal bölgelerde, oksijenle zenginleştirmenin sıcaklık seviyelerini arttırmadığı, bu duruma da, herhangi bir teğetsel hız bileşeninin bulunmamasının neden olduğu ortaya konulmuştur.

- Oksijenle zenginleştirilmiş yanma şartlarında yakılan kok fırını gazı ve jeneratör gazı için, havanın içerisindeki O<sub>2</sub> miktarı arttırıldıkça yanma odasının eksenini boyunca tahmin edilen NOX seviyelerinin yükseldiği belirlenmiş olup özellikle % 50 O<sub>2</sub> içeren hava ile gerçekleştirilen yanmada, kok fırını gazı için bu değerin 1800 ppm dolaylarında olduğu saptanmıştır.

- Oksijenle zenginleştirilmiş yanma şartlarında yakılan her iki kömür gazının yakılması esnasında kullanılan havanın içerisindeki O<sub>2</sub> miktarı arttırıldıkça, yanma odası eksenini boyunca tahmin edilen CO seviyelerinin azaldığı, CO<sub>2</sub> seviyelerinin arttığı belirlenmiştir. Bu durumda da oksijenle zenginleştirilmiş yanmanın yanma performansını arttırdığı rahatlıkla söylenebilir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

ANSYS Fluent 18.0 programının kullanımından dolayı yazarlar Gazi Üniversitesi'ne teşekkür ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] İlbaş, M., Karyeyen, S. "Modelling of combustion performances and emission characteristics of coal gases in a model gas turbine combustor", *International Journal of Energy Research*, 38(9): 1171-1180, (2014)
- [2] Bordbar, M. H., Weceł, G., Hyppänen, G. "A line by line based weighted sum of gray gases model for in homogeneous CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O mixture in oxy-fired combustion", *Combustion and Flame*, 161(9): 2435-2445, (2014).
- [3] Normann, F., Andersson, K., Leckner, B., Johnsson, F. "High-temperature reduction of nitrogen oxides in oxy-fuel combustion", *Fuel*, 87(17-18): 3579-3585, (2009).
- [4] Kez, V., Liu, F., Consalvi, J.L., Ströhle, J., Epple, B. "A comprehensive evaluation of different radiative transfer models in a gas turbine combustor under conditions of oxy-fuel combustion with dry recycle", *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 172: 121-133, (2016).
- [5] Li, H., Yan, J., Yan, J., Anheden, H. "Impurity impacts on the purification process in oxy-fuel combustion based CO<sub>2</sub> capture and storage system", *Applied Energy*, 86: 202-213, (2009).
- [6] Buhre, B.J.P., Elliott, L.K., Sheng, C.D., Gupta, R.P., Wall, T.F. "Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation", *Progress in Energy and Combustion Science*, 31: 283-307, (2005).
- [7] Toftegaard, M.B., Brix, J., Jensen, P.A., Glarborg, P., Jensen A.D. "Oxy-fuel combustion of solid fuels", *Progress in Energy and Combustion Science*, 36: 581-625, (2010)
- [8] Zannis, C. T., Hountalas, D.T. "DI diesel engine performance and emissions from the oxygen enrichment of fuels with various aromatic content", *Energy & Fuels*, 18: 659-666, (2004).
- [9] Ditaranto, M., Hals, J. "Combustion instabilities in sudden expansion oxy-fuel flames", *Combustion and Flame*, 146: 493-512, (2006).
- [10] Chen, L., Yong, Z.S., Ghoniem, A.F. "Oxy-fuel combustion of pulverized coal: Characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling", *Progress in Energy and Combustion Science*, 38: 156-214, (2012).
- [11] Yoshiie, R., Hikosaka, N., Nunome, Y., Ueki, Y., Naruse, I. "Effects of flue gas re-circulation and nitrogen contents in coal on NOX emissions under oxy-fuel coal combustion", *Fuel Processing Technology*, 136: 106-111, (2015).
- [12] İlbaş, M., Yılmaz, I. ve Kaplan, Y., "Investigation of hydrogen and hydrogen-hydrocarbon composite fuel combustion and NOX emission characteristics in a model combustor", *International Journal of Hydrogen Energy*, 30: 1139-1147, (2005).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

## Pore characterization of volcanic tuffs used as building stone in Afyonkarahisar (Turkey)

### *Afyonkarahisar'da yapıtaşı olarak kullanılan volkanik tüflerin gözenek özellikleri*

Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa Yavuz ÇELİK<sup>1</sup>, Ayşe ERGÜL

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-9695-7370

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Çelik M. Y. and Ergül A., "Pore characterization of volcanic tuffs used as building stone in Afyonkarahisar (Turkey)", *Politeknik Dergisi*, 21(1): 101-112, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.385929

# Pore Characterization of Volcanic Tuffs Used as Building Stone in Afyonkarahisar (Turkey)

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Mustafa Yavuz ÇELİK<sup>1\*</sup>, Ayşe ERGÜL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon Meslek Yüksek Okulu, Doğal Yapıtaşları Teknolojisi Programı, Afyonkarahisar, Türkiye  
<sup>2</sup>Yayla Mah. Bağcı Cad. 88/5 Etlik- Keçiören, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 08.01.2017 ; Kabul/Accepted : 31.03.2017)

## ABSTRACT

The tuffs have been used as a building material for hundreds of years. The physical and mechanical properties of tuffs are affected by the amount of pore and its geometry. The pore characteristics of the building natural stone of Seydiler and Ayazini (Afyonkarahisar-Turkey) tuffs were investigated in this article. For determination of the mineralogical and petrographical properties of the tuff; a polarizing optical microscope, X-ray diffractometry and scanning electron microscope (SEM) were used. Tuffs are composed of a mineral assemblage of various crystals including quartz, feldspar; mafic mineral is biotite and rock particles with glass cement. SEM images show the presence of numerous voids in tuffs. The mean value of effective porosity of the Ayazini and Seydiler tuffs was 37.3% and 36.0%. Mercury porosimetry was used to determine the pore size distribution. Ayazini tuffs have pore sizes ranging from about 200.000 to 10 nm and Seydiler tuffs ranging from about 7.000 to 10 nm.

**Keywords:** Tuff, porosity, pore-size distribution, mercury porosimetry, building stone.

## Afyonkarahisar'da Yapıtaşı Olarak Kullanılan Volkanik Tüflerin Gözenek Özellikleri

### ÖZ

Tüfler yüzlerce yıldır yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Tüflerin fiziksel ve mekanik özellikleri, gözenek miktarı ve geometrik özelliklerinden etkilenmektedir. Bu makalede, doğal yapı taşı olarak kullanılan Seydiler ve Ayazini (Afyonkarahisar-Türkiye) tüflerinin gözenek özellikleri araştırılmıştır. Tüflerin mineralojik ve petrografik özelliklerinin belirlenmesi için; polarize optik mikroskop, XRD analizi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Tüfler kuvars, feldispat kristallerinin yanı sıra; mafik mineral olarak biyotit ve kayaç parçacıkları içermektedir. SEM görüntüleri, tüflerde çok sayıda boşluk bulunduğunu göstermektedir. Ayazini ve Seydiler tüflerinde gözenekliliğin ortalama değeri % 37.3 ve % 36.0'dır. Gözenek boyut dağılımını belirlemek için cıva porozimetresi kullanılmıştır. Gözenek boyutları, Ayazini tüflerinde yaklaşık 200.000 - 10 nm ve Seydiler tüflerinde yaklaşık 7.000 - 10 nm arasında değişmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Tüf, gözeneklilik, gözenek boyut dağılımı, cıva porozimetresi, yapı taşı.

### 1. INTRODUCTION

Tuff is a type of rock consisting of consolidated volcanic ash ejected from vents during a volcanic eruption. Tuff rocks can be used at construction sector and in landscape architecture. Tuff stones used in masonry are welded tuffs and the masonry walls made of tuff stone is more durable than concrete and brick walls. After application on building, tuff stones have been stucked together firmly each day due to their consolidation characteristic. Tuff stones were used densely in many buildings constructed in Ottoman and Seljuk Turks era in central Anatolia [1].

Great part of the Afyon region is covered by volcanic tuff so it is easy to carve out stones to build temples and monument. There are many open-air temples, monuments, natural rock formation, fairy chimneys and rock-cut churches. It is known to be used as a settlement since the Phrygian period.

The village of Ayazini has many cave settlements, also an early Christian church and tombs dating from antiquity and the Byzantine period which is carved in the volcanic tuff stone (Fig 1). The churches have been well preserved despite all atmospheric effects which may damage to the tuff constructed. Ayazini tuffs have been traditionally used as a building material in many areas in local building construction in the region since pre-historical times. Most of the major building stone quarries working today are located in the Ayazini region.

The most of the historical buildings such as mosques and fountains in Afyon (Turkey) were made of tuffs by Ottoman civilizations. This tuff rock was produced in the stone quarries nearby Ayazini, Afyon. The parts of the many fountains and mosques were constructed of Ayazini tuffs which are carved easily due to being moister inside the tuffs. After the vaporization of the moister they became hardened. However, due to having very high ratio of porosity in tuffs, which is the reason of the high-water absorption feature, it's weathered very easily.

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

In the Afyon – İscehisar – Bayat – Kırka – Şuhut areas, potassic and ultrapotassic alkaline magmatism followed Upper Eocene - Middle Miocene calc-alkaline volcanism, which was related to the northward subduction of the African Plate beneath Eurasia. The alkaline volcanism lasted from 14.8 Ma (in the north) to 4 Ma (in the south) and was associated with a presently still active extensional tectonic regime [2, 3]. Around the Kırka-Afyon region, a thick sequence of acid tuff interlayered with subordinate calc-alkaline lava flows

A considerable amount of work has been done by Metin et al [6], Kavas and Çelik [7], Kuşçu and Yıldız [8], Demir et al [9] studied the geology, industrial, physical and engineering properties aspects of Ayazini tuffs in Afyonkarahisar region.

Tuff stone is very porous in nature so its density, uniaxial compressive strength and P-wave velocity is lower than other rocks. Porosity is one of the important physical properties that govern physical attributes of rocks such as



**Fig 1.** Ancient civilizations carved great caves and underground cities out of the soft volcanic rock (a). One great example the Oyma Church made of tuffs by the Early Christians in Ayazini (Afyon, Turkey) (b).

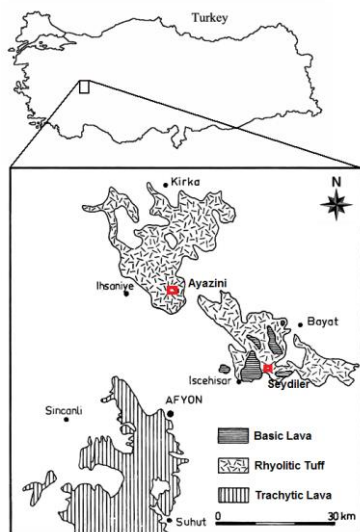
and breccia crops out. It is covered by a continental sedimentary succession containing subordinate tuffs. The tuff sequence yielded K/Ar ages between  $21 \pm 0.4$  Ma and  $15.4 \pm 1.7$  Ma [4] and is overlain by basic K-alkaline lavas. The tuffs in the north of Afyon cover an area of about 2000 km<sup>2</sup> (Fig 2). They overlie a marked relief in Paleozoic schist and marbles. They are laterally intercalated with Neogene lacustrine sediments. Their stratigraphic position is Pliocene. The tuff unit has a maximum thickness of 300 m and consists of a basalt main flow unit of about 200 m and 2-3 following minor flow units [5].

strength, deformability and hydraulic conductivity [10]. Effective porosity does not necessarily reflect the durability of the tufts, and water absorption is a better indicator. However, the sensitivity of the tuff to weathering can be approximately estimated by analyzing pore-size distribution; focusing on the presence of small capillary pores or micro pores [11].

Weathering processes cause progressive changes in rock porosity due to alterations in pore size distribution, pore geometry, pore connectivity, pore infilling and new pore formation. Interactions between mechanical, lithological and pore properties of rocks, and the nature of the weathering processes affecting them, create a complex system [10]. Several investigators have studied weathering of tuffs [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17] also they show that rock fabric characteristics, especially pore geometry, affecting rock susceptibility to weathering.

Various investigators have studied the effect of weathering on the engineering properties of tuffs [18, 19, 20, 21, 22] many investigators have studied the effect of porosity and weathering on the engineering properties of different types of rock [23, 24, 25, 26, 27, 28] several investigators have reported pore size and its distribution of the rocks [29, 30].

Mercury intrusion characterizes a material's porosity, its pore size and pore volume. The test instrument typically uses a non-wetting fluid with a high surface tension, such as mercury, to characterize the material's porosity. Since the mercury porosimetry study of Ritter and Drake [31], it has been widely used in industry. Its applications have varied from the study of pore structure and fluid distributions by Pickell et al [32], studied by Klavetter



**Fig 2.** Map of the Ayazini and Seydiler rhyolitic tuff in the region of Afyon-Turkey [5]

and Peters [33] regarding hydrologic properties of volcanic tuff [34]. Many investigators have reported pore size and its distribution with using mercury intrusion of the rocks [34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41] they also describe general concepts of mercury porosimetry measurements and determination pore size distribution and its characterization. Vacchiano et al, [42] measured the pore-size distribution by mercury porosimetry of yellow and grey tuff stones of the historic buildings in Salerno (Italy). Their purpose was treating yellow and grey tuff stones with different polymeric materials. Scanning electron microscope (SEM) and image processing technologies provide new scopes for researching the internal structure of rocks, soils and concrete [43, 44, 45, 46, 47, 48, 49].

## 2. MATERIAL and METHOD

The physical and mechanical properties of tuffs are affected by the amount of pore and its geometry. The pore characteristics of the building natural stone of Seydiler and Ayazini (Afyonkarahisar) tuffs were investigated in this article. Samples from the tuff quarries of Ayazini and Seydiler region were analyzed by using several analytical techniques. For determination of the mineralogical and petrographic analyses of the tuff, a polarizing optical

Method of the high pressure porosimetry is based on phenomenon of the mercury capillary depression, where the wettability angle is  $>90^\circ$  and mercury leaks into pores by the effect of pressure. Mercury volume infiltrated into a pore system (Fig 3) is generally interpreted as total pore volume in measured specimen. Relationship between actual pressure  $p$  and cylinder pore radius  $D$  is expressed by Washburn equation (1):

$$p = -4 \gamma \cos\theta / D \quad (1)$$

where  $p$  [Pa] is an actual pressure,  $D$  [nm] half-length distance of two opposite walls of a pore expressed by an effective radius,  $\gamma$  surface tension of mercury [ $480 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ ] and  $\theta$  contact angle of mercury [ $141.3^\circ$ ] [39].

## 3. EXPERIMENTAL INVESTIGATION and RESULTS

### 3.1. Mineralogical and Petrographic Analysis

Mineralogical and petrographic properties of the Ayazini and Seydiler tuffs were studied using a polarizing optical microscope, X-ray diffractometry (XRD), and scanning electron microscope (SEM).

#### 3.1.1. Polarizing optical microscope analyses

Standard thin sections were prepared for mineralogical and petrographic descriptions. For determination of the

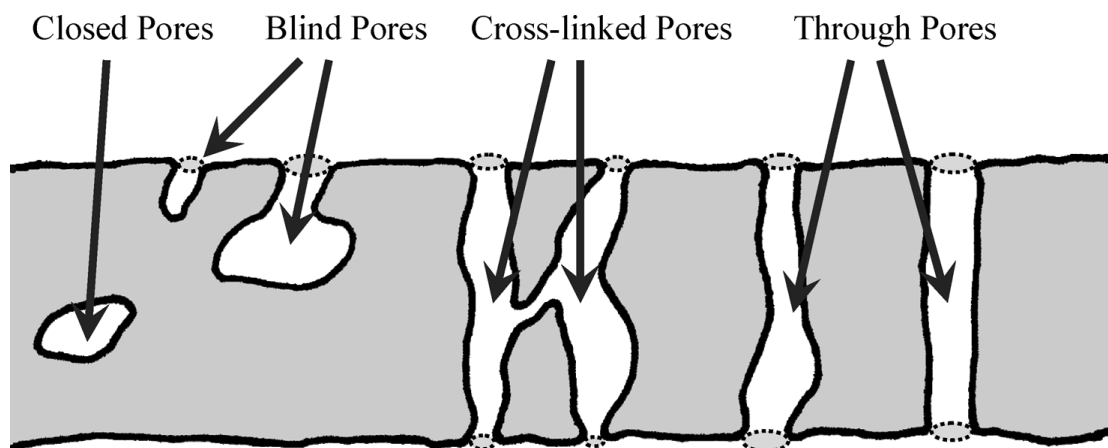
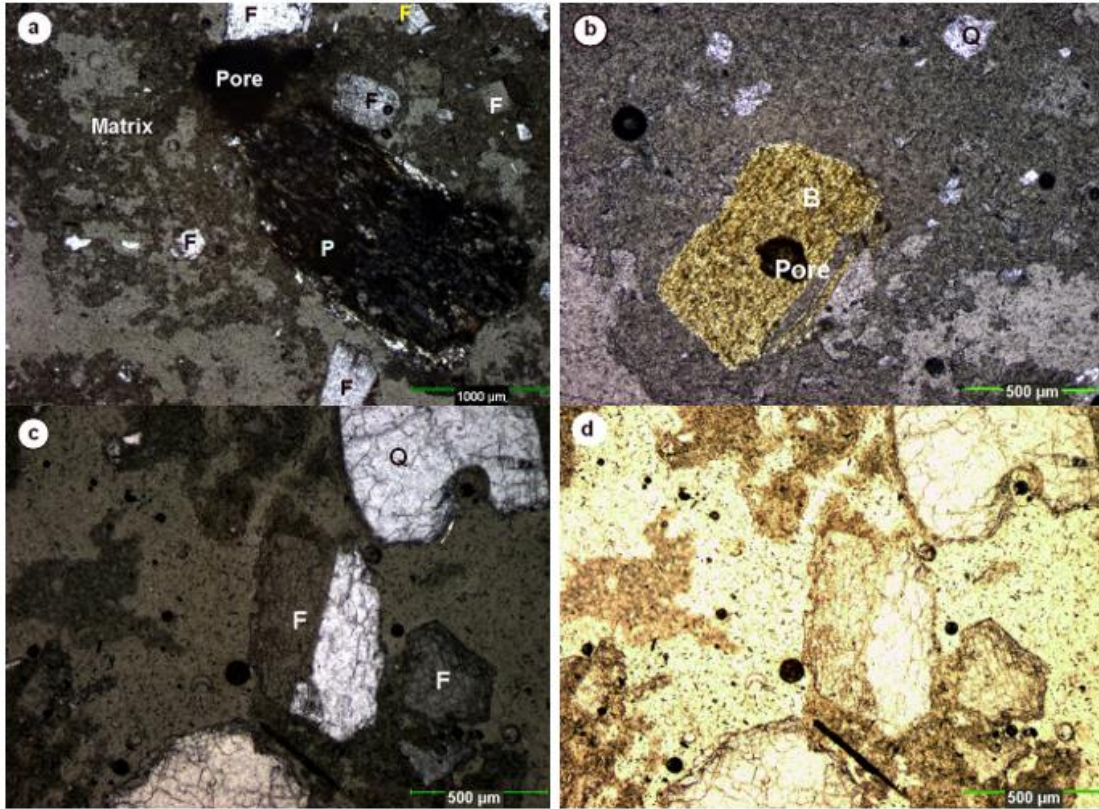


Fig 3. Schematic representation of pores [50]

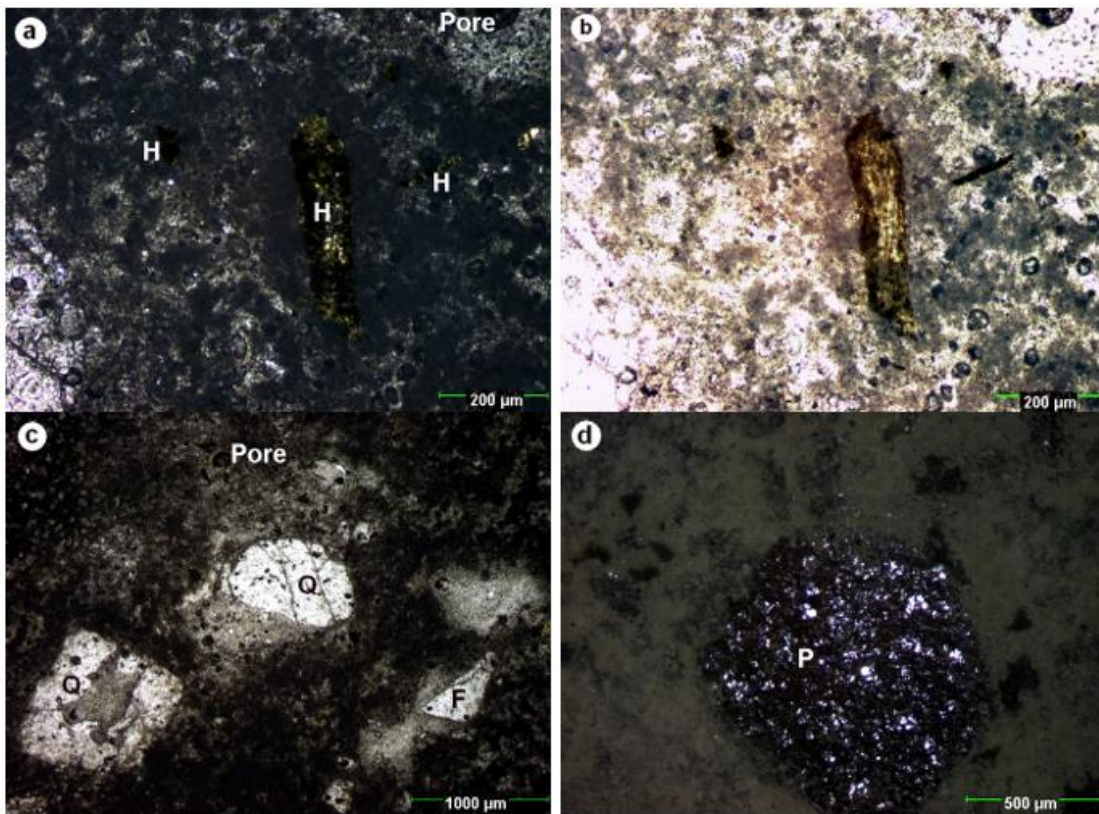
microscope and scanning electron microscope (SEM - LEO 1430 VP in TUAM Laboratory in Afyon Kocatepe University) were used. During the preparation of samples, each sample was covered by a thin carbon film. In this study, mercury porosimetry was employed for the determination of porosity and pore-size distribution. Mercury porosimetry relies on capillary theory and the non-wetting property of mercury to determine porosity, pore-size distribution and pore surface area by forcing mercury into matrix samples under pressure. A "Quantachrome Corporation Poremaster 60" in the Central Laboratory of Middle East Technical University (Ankara-Turkey) was used for the mercury intrusion porosimetry measurements with the test conditions of a surface tension mercury-vacuum of  $480.00 \text{ erg/cm}^2$  and a contact angle mercury-tuff of  $140^\circ$ .

mineralogical composition of the tuffs, a polarizing optical microscope was used. The Ayazini tuff contains crystals of quartz, feldspar, biotite and opaque minerals (Fig 4). Various rock fragments and pumice are also present. The crystals, rock fragments and pumice are embedded in a tuffaceous matrix. In the tuffaceous matrix, volcanic glass shards are rather common. The optic-microscope data of these tuffs that are examined petrographically, also conform with XRD data. The Seydiler tuff is composed of a mineral assemblage of various crystals including quartz, feldspar; mafic mineral is biotite and rock particles with glass cement (Fig 5). Physical weathering causes fracturing of feldspars, especially along their cleavage planes, within the both tuffs.





**Fig 4.** Thin section photomicrographs of Ayazini tuffs illustrating various pyroclasts (F) feldspar, (Q) quartz, (B) biotite, various size of pore and (P) pumice grain. Photomicrographs of 4a, b, and c taken with crossed nicols, 4d with plane polarized light



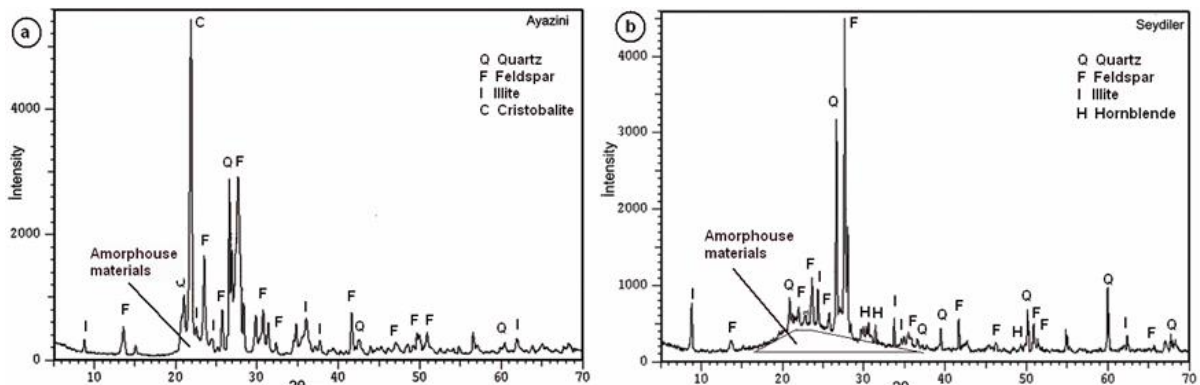
**Fig 5.** Photomicrographs of Seydiler tuff, feldspar (F), quartz (Q) and hornblende (H) minerals settled in glassy matrix, various size of pore and (P) pumice grain. Photomicrographs of 4a, c, and d taken with crossed nicols, 4b with plane polarized light

**3.1.2. XRD analyses**

X-ray diffraction analysis was performed on Ayazini and Seydiler tuff samples in order to determine the mineralogical nature of their crystalline phases. XRD analyses of the Ayazini tuff reveal that feldspar, quartz, cristobalite and illite (mica) are present within the tuff. XRD analyses for the Ayazini tuff indicated illite (mica)-type clay minerals. A typical XRD pattern for an Ayazini tuff samples are depicted in Fig. 6a. The Seydiler tuff samples are composed of feldspar, quartz, hornblende and illite (mica) (Fig. 6b). Cristobalite is present only in Ayazini tuff samples and is the dominant silica phase. In addition to these minerals, an important component of amorphous materials (volcanic glass) constitutes the both tuffs. Erguler [16] have indicated that volcanic glass is

**3.1.3. SEM analyses**

Photomicrographs of the minerals and texture identified using the SEM is shown in Fig 7 and 8. Presences of feldspar, quartz are smectite are detected in the Ayazini tuffs. The Seydiler tuffs are composed of feldspar, quartz, smectite and illite. It was determined that flaky morphology smectite is the main clay mineral in both tuffs. In general, smectite develops in fissures, fractures and dissolution voids of the volcanic glass. Alteration of feldspars results in formation of smectites. Formation of smectite is closely related to hydrolysis of volcanic glass and alteration of feldspar. In all tuff samples, smectite develops on and along the edges of feldspar as well as volcanic glass.



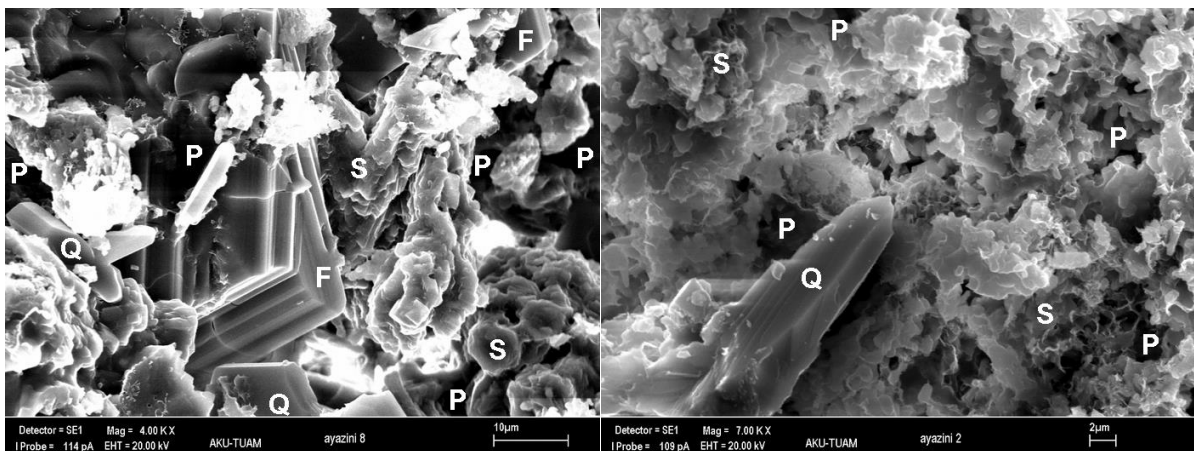
**Fig 6.** X-ray diffraction (XRD) diffractogram of Ayazini (a) and Seydiler (b) tuff samples. The figures show also the assignation of peaks to the main minerals identified in the analyzed tuffs samples

the least stable component of tuffs and decomposes more readily than the other associated minerals phases. Overall evaluations of the findings show that chemical weathering produces a small amount of clay minerals, namely illite within the Ayazini and Seydiler tuffs. Summarizing, the characterization performed on the samples of Ayazini and Seydiler tuff collected in different quarries show that the stones have a similar composition to that of the original materials.

**3.2. Pore-Size Distribution of Tuffs**

**3.2.1. The influence of porosity and its importance**

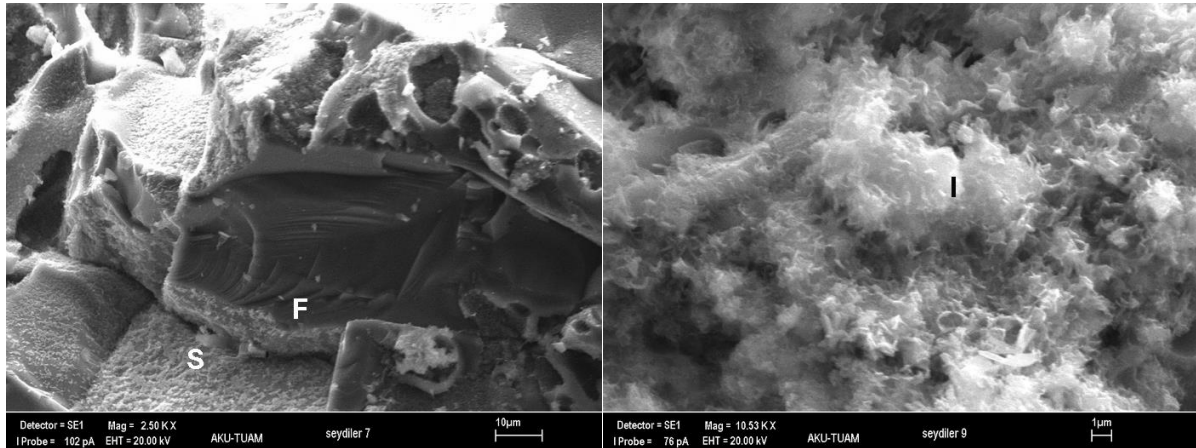
Total porosity is the ratio of the total void volume to the total bulk volume. Porosity ratios traditionally are multiplied by 100 and expressed as a percent. Total porosity can be classified as primary or secondary. Primary porosity is the porosity that forms when the tuff is deposited, whereas secondary porosity is formed after the tuff was deposited. Secondary porosity includes



**Fig 7.** SEM images of Ayazini tuff, SEM images show the presence of numerous dissolution voids (P), quartz (Q) and feldspar (plagioclase) (F) minerals in Ayazini tuffs. Platy and honeycomb textured smectite (S) developing around on the feldspar minerals

cavities produced by the solutioning of some minerals and by fractures.

micropores, materials with pores between 2 and 50 nm are called mesopores, and material with pores greater



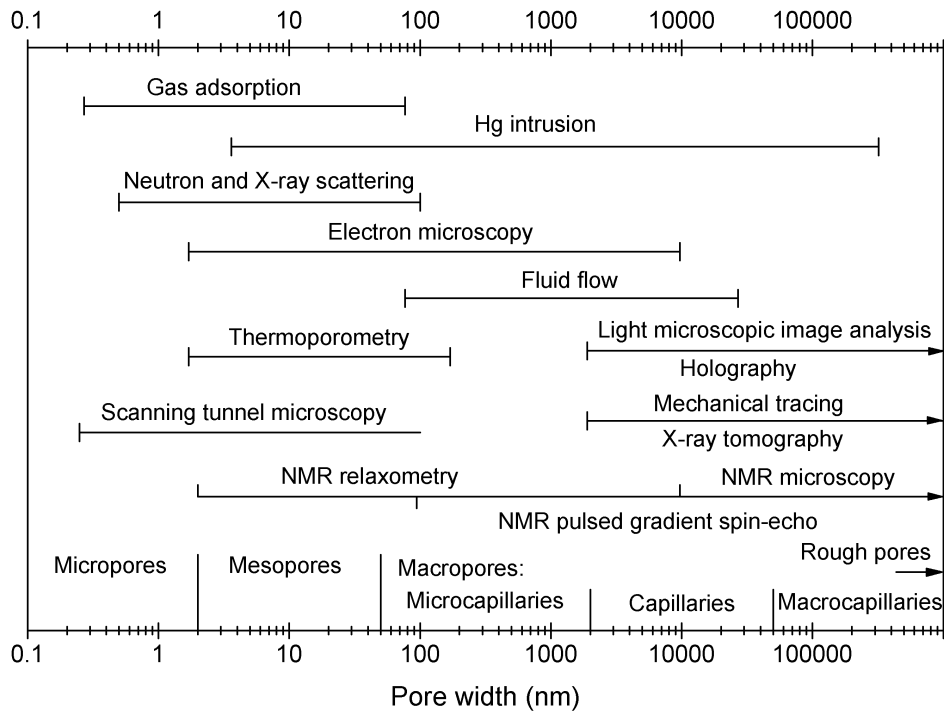
**Fig 8.** Scanning electron micrograph of tuff sample from Seydiler, the SEM image shows smectite (S) developing around on the feldspar (F) minerals and illite (I) minerals in Seydiler tuffs

Several methods have been developed for determining the surface area and the pore size distribution in porous systems. The operations of these different methods are generally based on different physical principles. It should be expected, therefore, that they effectively represent probes of different sizes and, hence, that the pore size ranges in which they are most reliable are necessarily different. Figure 9 compares the ranges of validity of a selection of methods commonly used for pore characterization [51].

than 50 nm are macropores [52]

Solid particles from crushing or grinding operations and weathering or leaching processes often will be found to have cracks, cavities, and holes (collectively called pores) within their structure. As well as many natural stone especially tuffs pore structure influence the physical properties of building stone, including porosity, unit weight, absorption water by weight, ultrasonic pulse velocity, strength, and failure behavior. Some physical and mechanical test results of the Ayazini and Seydiler tuffs are given in Table 1.

Porous material is classified according to the size of pores: material with pores less than 2 nm are called



**Fig 9.** Measuring ranges of methods for pore size determination [51]

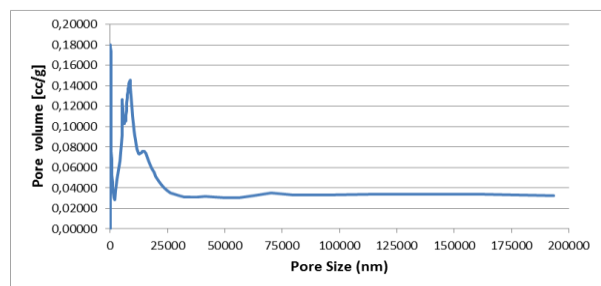
**Table 1.** Average physical and mechanical properties of tuffs rocks [53]

Tests	Ayazini Tuff			Seydiler Tuff		
	Min	Max	Av.	Min	Max	Av.
Dry unit weight (kN m <sup>-3</sup> )	1.81	1.88	1.85	1.66	1.80	1.74
Density	2.39	2.44	2.42	2.27	2.31	2.29
Absorption by weight (%)	16.73	17.18	16.93	17.93	19.56	18.51
Absorption by volume (%)	26.59	27.42	27.00	23.68	25.24	24.21
Porosity (%)	34.30	39.50	37.30	33.60	38.70	36.00
Uniaxial compressive strength (MPa)	21.61	23.68	22.21	17.14	20.76	19.07
Flexural strength (MPa)	1.28	1.50	1.37	0.99	1.12	1.07
Dry ultrasonic pulse velocity (km s <sup>-1</sup> )	1885	2168	1990	2505	2848	2675

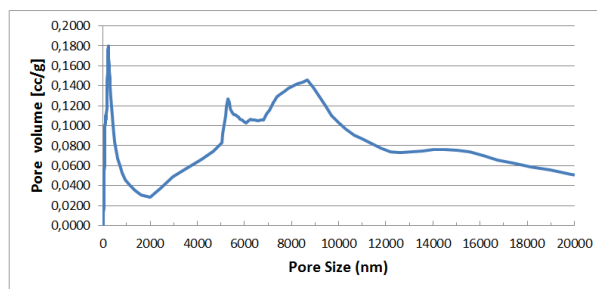
Mercury porosimetry is probably the most commonly indirect technique used to characterize the pore space allowing to calculate the total connected porosity and its pore size distribution. But mercury porosimetry only measures pores access and real pore size was usually misestimated. Determination of the total open porosity used to helium pycnometers method. The mean value of effective porosity of the Ayazini and Seydiler tuffs was 37.3% and 36.0%. A “Quantachrome Corporation Poremaster 60” mercury porosimetry was used to determine the pore size distribution. Incremental intrusion volumes are used to predict the pore-size distribution range from atmospheric pressure to 200 MPa.

**3.2.2. Pore-size distribution of Ayazini tuffs**

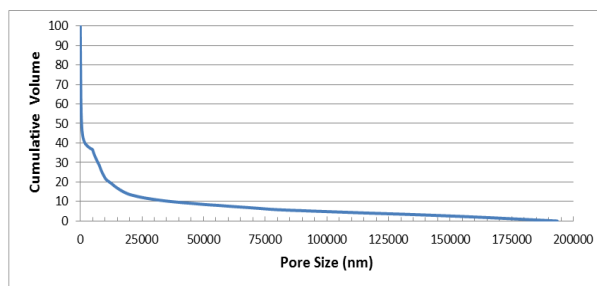
The pore size distribution study was carried out with mercury intrusion porosimetry (MIP) testing. The cumulative intruded pore volume curves for Ayazini tuffs, obtained from MIP, are provided in Fig 10. Ayazini tuffs have pore sizes ranging from about 10 nm (0,010 μm) to 20.000 nm (20 μm) (Fig 11). Fig. 12 illustrates the results of pore-size distributions, as relative cumulative volume. Thus, the size of pores varies widely from nanometer to micrometer. Mercury porosimetry results show that most of the pores (>80%) have a pore access diameter of between 200.000 and 10 nm, mega pores reaching up to 200.000 nm in diameter were also observed.



**Fig 10.** Mercury intrusion porosimetry of tuff from Ayazini tuff, plots report pore-size distributions, as relative pore volume



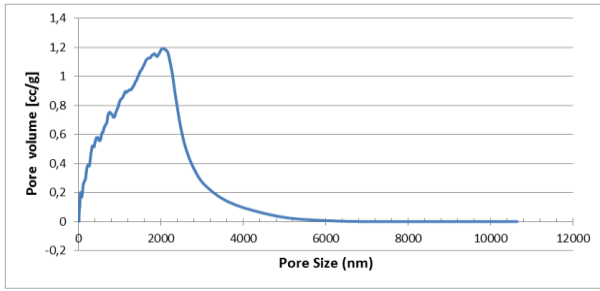
**Fig 11.** Mercury intrusion porosimetry of tuff from Ayazini tuff, since the size of pores varies widely from 10 nm (0,010 μm) to 20.000 nm (20 μm)



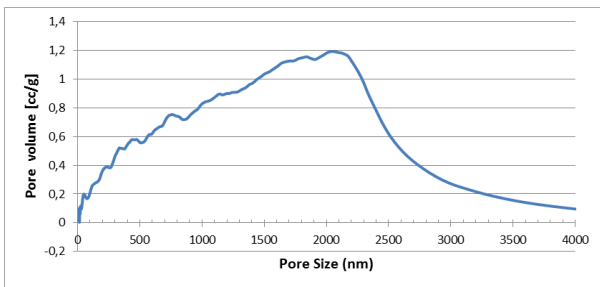
**Fig 12.** The cumulative intruded pore volume curves obtained from MIP for Ayazini tuff

**3.2.3. Pore-size distribution of Seydiler tuffs**

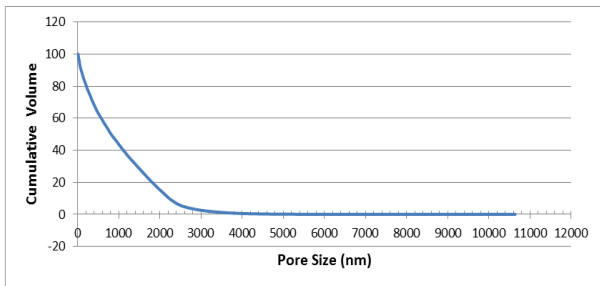
Mercury intrusion porosimetry of tuff from Seydiler, plots report pore-size distributions, as relative pore volume is provided in Fig 13. Seydiler tuffs have pore sizes ranging from about 10 nm (0,010 μm) to 4.000 nm (4 μm) (Fig 14). Fig. 15 illustrates the results of pore-size distributions, as relative cumulative volume. Since the size of pores varies widely from nanometer to micrometer. Mercury porosimetry results show that most of the pores (>80%) have a pore access diameter of between 3.000 and 10 nm, mega pores reaching up to 10.000 nm in diameter were also observed. Seydiler tuffs have a smaller porosity compared to that of the Ayazini tuffs.



**Fig 13.** Mercury intrusion porosimetry of tuff from Seydiler tuff, plots report pore-size distributions, as relative pore volume



**Fig 14.** Mercury intrusion porosimetry of tuff from Seydiler tuff, since the size of pores varies widely from 10 nm (0,010 μm) to 4.000 nm (4 μm)



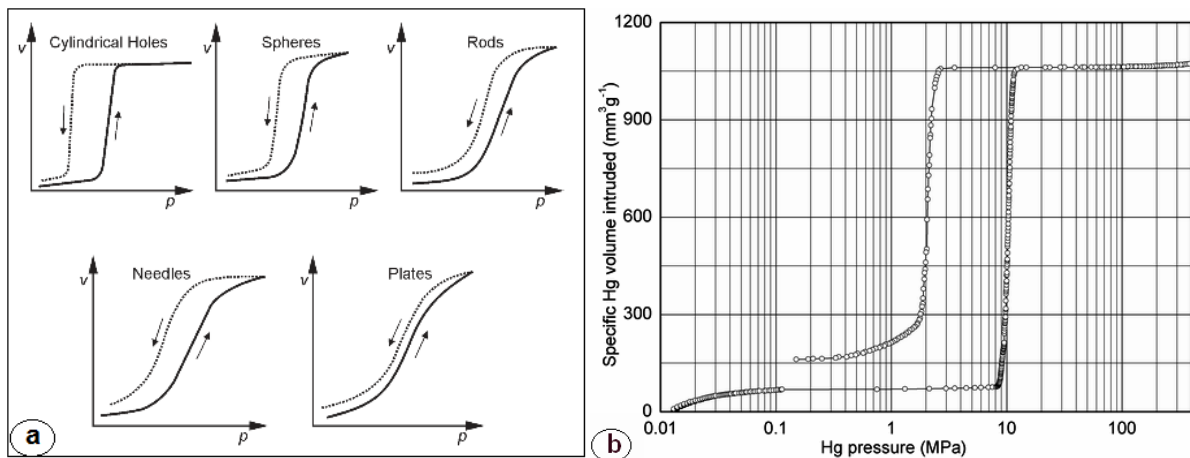
**Fig 15.** The cumulative intruded pore volume curves obtained from MIP for Seydiler tuff

**4. PORE CHARACTERIZATION OF TUFFS**

The accuracy of pore diameter measurements by mercury porosimetry when the pores are right circular cylinders is exceptionally good, agreeing to at least 0.008 μm openings. However, true circular cross-section pores or pores of any regular geometry are rarely encountered in real materials. On the contrary, shapes of typical pores are slits, cracks, fissures, or highly irregular interstitial voids between particles. In order for the mathematics of pore characterization to be manageable, it is convenient to treat the filling of these complex pores as if they were right circular cylinders. This means that pore data from mercury porosimetry should be understood and used as equivalent cylindrical dimensions, just as the particle size determined by sedimentation of nonspherical particles is an equivalent spherical diameter. How pore shape alters basic pressure-volume curves is illustrated in Figure 16a. Figure 16b shows a typical intrusion/extrusion curve (volume vs. pressure curve) of a porous glass with a hysteresis loop that is typical for cylindrical pores [51, 54].

Cylindrical pores are observed for microporous solids having relatively small external surfaces (e.g. activated carbons, molecular sieve zeolites, and certain porous oxides). The limiting uptake is governed by the accessible micropore volume rather than by the internal surface area. Fig. 17 shows volume vs. pressure curve of Ayazini tuffs (a) and Seydiler tuffs (b). The mercury porosimetry analysis of Ayazini and Seydiler tuffs are observation the pore geometry as cylindrical holes in Fig 16a.

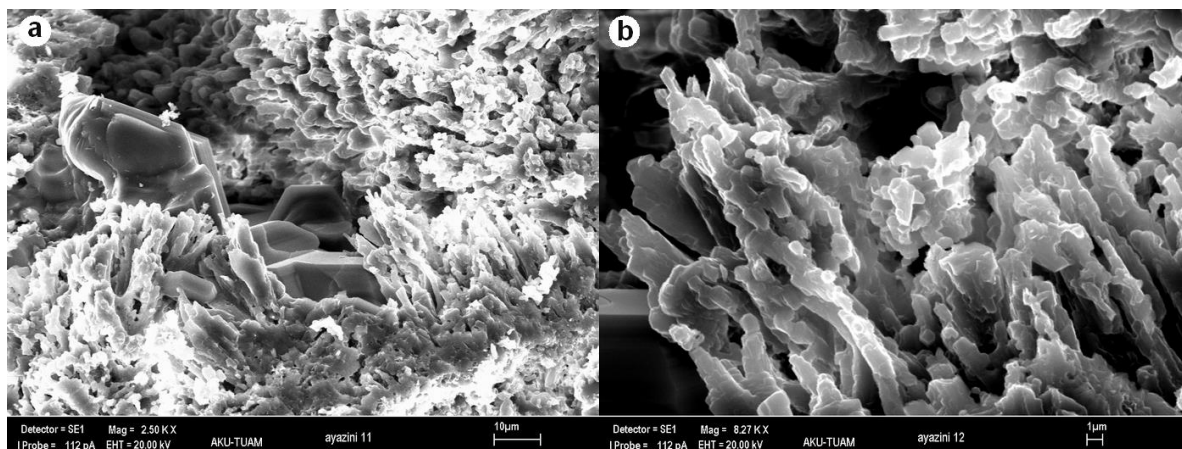
SEM images of Ayazini tuffs show the presence of numerous pores. SEM image of the slightly collapsed pumice fragments showing irregular vesicle shapes from pipes to pods. Slot pores comprise a honeycomb like structure, bounding the surfaces of flanking grains. Micro channels exhibit elongated shapes; in general, the walls of the micro channels appear to be irregular (Fig 18).



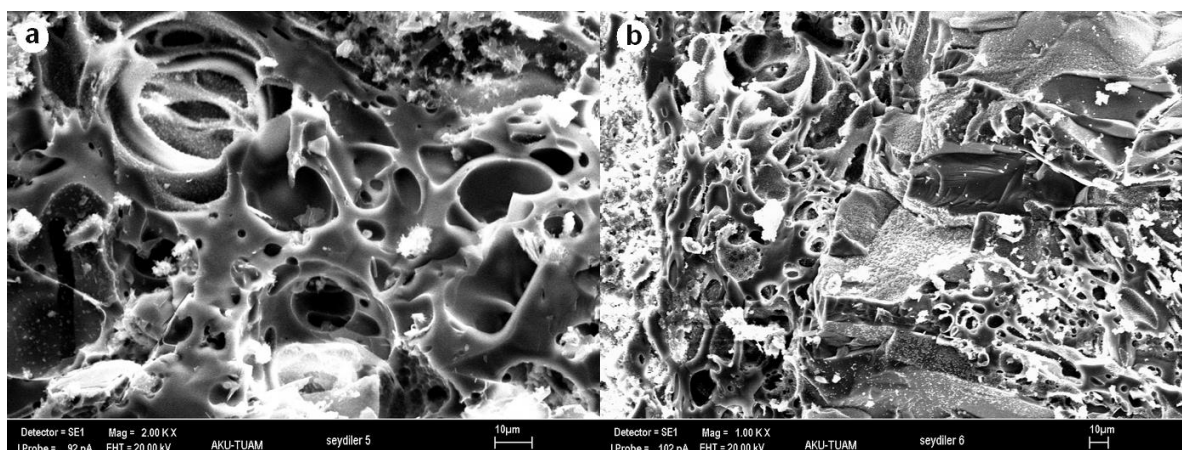
**Fig. 16.** Characteristic hysteresis loops for cylindrical holes and for pores formed within aggregates (a), intrusion/extrusion curve (volume vs. pressure curve) of a porous glass (b) [51]

Spherical shapes are associated with platy minerals (clays). This pore type has different sizes which are distributed within the Seydiler tuff sample (Fig 19). Pores are present mainly in volcanic glass matrix, which makes up the intergranular cement of the tuff rock.

and opaque minerals. Seydiler tuff is composed of a mineral assemblage of various crystals including quartz, feldspar; mafic mineral is biotite and rock particles with glass cement. The optic-microscope data of these tuffs that are examined petrographically, also conform with



**Fig 18.** SEM photo-micrograph of Ayazini tuffs is showing irregular pore shapes and flaky form. (scale (a): 10 microns, (b): 1 microns). This kind of welded tuffs with pores tuff (ignimbrite) is called



**Fig 19.** SEM photo-micrograph of Seydiler tuffs showing volcanic glass porosity (a), SEM image of the slightly collapsed pumice fragments showing irregular vesicle shapes from pipes to pods (b), (scale 10 microns)

## 5. CONCLUSIONS

Physical properties such as porosity and water absorption are good indicators of mechanical and weathering behavior of tuff rocks. Natural materials pore structure influence the physical and mechanical properties of building stone, including elastic module, compressibility, thermal conductivity, poroelastic parameters, strength, and failure behavior. Both of Ayazini and Seydiler tuffs are highly porous. The Ayazini and Seydiler tuffs the mean value of effective porosity was 37.3% and 36.0%. The pore-size distribution was measured by means of a mercury porosimetry on all the specimens examined. Mercury porosimetry is a very widely accepted method for determining total volume and pore size distribution in the mesopore and macropore ranges.

For determination of the mineralogical composition of the tuffs, a polarizing optical microscope was used. Ayazini tuff contains crystals of quartz, feldspar, biotite

XRD data. XRD analyses of the Ayazini tuff reveal that feldspar, quartz, cristobalite and illite (mica) are present within the tuff. XRD analyses for the Ayazini tuff indicated illite (mica)-type clay minerals.

Seydiler tuff samples are composed of feldspar, quartz, hornblende and illite (mica). Cristobalite is present only in Ayazini tuff samples and is the dominant silica phase. Chemical weathering produces a small amount of clay minerals findings namely illite within the Ayazini and Seydiler tuffs.

Photomicrographs of the minerals and texture are identified using the SEM images. In all tuff samples, smectite develops on and along the edges of feldspar as well as volcanic glass.

Several methods have been developed for determining the surface area and the pore size distribution in porous systems. Mercury porosimetry is probably the most commonly indirect technique used to characterize the

pore space allowing calculating the total connected porosity and its pore size distribution. The pore size distribution study was carried out with mercury intrusion porosimetry (MIP) testing. Fig. 20 shows pore volume (%) versus pore radius of tested tuff stone. Ayazini tuffs have pore sizes ranging from about 10 nm (0,010  $\mu\text{m}$ ) to 20.000 nm (20  $\mu\text{m}$ ). Mercury porosimetry results show that most of the pores (>80%) have a pore access diameter of between 200.000 and 10 nm (Fig. 20). Seydiler tuffs have pore sizes ranging from about 10 nm (0,010  $\mu\text{m}$ ) to 4.000 nm. Mercury porosimetry results show that most of the pores (>80%) have a pore access diameter of between 3.000 and 10 nm (Fig. 20). Seydiler tuffs have a smaller porosity compared to that of the Ayazini tuffs.

The mercury porosimetry analysis of Ayazini and Seydiler tuffs are the observation of the pore geometry as cylindrical holes. SEM images of Ayazini tuffs show the presence of numerous pores. SEM image of the slightly collapsed pumice fragments show irregular vesicle shapes from pipes to pods. Slot pores comprise a honeycomb like structure, bounding the surfaces of flanking grains.

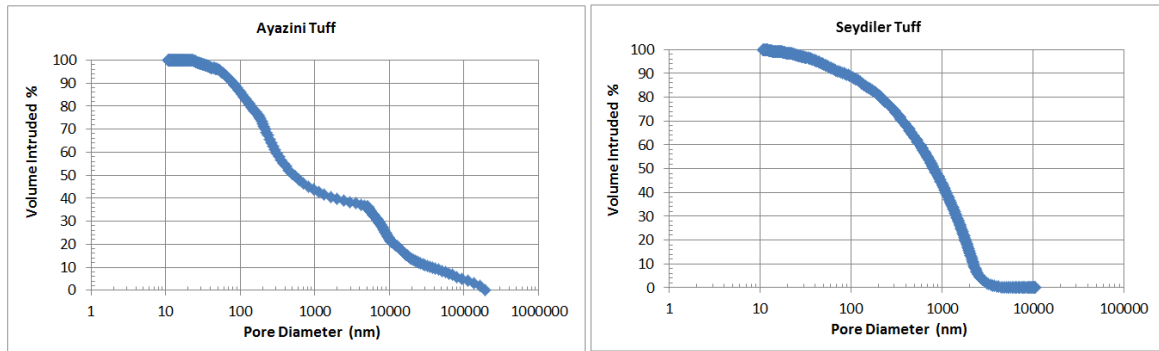


Fig 20. Pore volume (%) versus pore radius of Ayazini and Seydiler tuff stone

## REFERENCES

- [1] Yasar E., Tolgay A. and Teymen A., “Industrial usage of Nevşehir-Kayseri (Turkey) tuff stone”, *World Appl Sci J*, 7(3):271-284, (2009).
- [2] Francalanci L., Innocenti F., Manetti P. and Savaşçın M.Y., “Neogene alkaline volcanism of the Afyon – Isparta area, Turkey: petrogenesis and geodynamic implications”, *Miner Petrol*, 70:285-312, (2000).
- [3] Yıldırım D. and Altunkaynak Ş., Geochemistry of Neogene-Quaternary alkaline volcanism in western Anatolia, Turkey and implications for the Aegean mantle, *Int Geol Rev*, 52:579-607, (2010).
- [4] Besang C., Eckhardt F.J., Harre W., Kreuzer H. and Muller P. “Radiometriche altersbestimmungen an Neogenen eruptivgesteinen der Turkei”, *Geol Jb B*, 25:3-36, (1977)
- [5] Keller J. and Villari L., “Rhyolitic ignimbrites in the region of Afyon (Central Anatolia)”, *Bull Volcan*, 36:342-358, (1972).
- [6] Metin S., Genç Ş. and Bulut V., “The geology of Afyon”, *MTA Report Nu: 8103*, (not Published) (in Turkish), (1987).
- [7] Kavas T. and Çelik M.Y., “Usability of the Ayazini (Afyon) tuffs as trass material for cement production”, *Madencilik*, 40(2-3):39-46. (in Turkish), (2001).
- [8] Kuşçu M. and Yıldız A., “Usability of the Ayazini (Afyon) tuffs as building stone”, *Turkey III. Marble Symposium* Afyon, 85-98, (in Turkish), (2001).
- [9] Demir İ., Başpınar M.S. and Görhan G., “Mechanical properties of the natural construction stone of Ayazini Tuffs-Afyonkarahisar”, *MERSEM'2006 Turkey V. Marble and Natural Stone Symposium*, 31-38. (in Turkish), (2006).
- [10] Tuğrul A., “The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey”, *Eng Geol*, 75:215-227, (2004).
- [11] Torok A., Forgo L.Z., Vogt T., Lobens S., Siegesmund S. and Weiss, T. “The influence of lithology and pore-size distribution on the durability of acid volcanic tuffs, Hungary”, *Spec Publ Geol Soc Lond*, 271:251-260, (2007).
- [12] Topal T. and Doyuran V. “Analyses of deterioration of the Cappadocian tuff, Turkey”, *Environ Geol*, 34(1):5-20, (1998).
- [13] Topal T. and Sözmen B. “Deterioration mechanisms of tuffs in Midas Monument”, *Eng Geol*, 68:201-223, (2003).
- [14] Chen T.C., Yeung M.R. and Mori N., “Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action”, *Cold Reg Sci Technol*, 38:127-136, (2004).
- [15] Steindlberger E., “Volcanic tuffs from Hesse (Germany) and their weathering behavior”, *Environ Geol*, 46:378-390, (2004).
- [16] Erguler Z.A., “Field-based experimental determination of the weathering rates of the Cappadocian tuffs”, *Eng Geol*, 105:186-199, (2009).
- [17] Yavuz A.B., “Durability assessment of the Alaçatı tuff (Izmir) in western Turkey”, *Environ Earth Sci*, 67:1909-1925, (2012).
- [18] Topal T. and Doyuran V., “Engineering geological properties and durability assessment of the Cappadocian tuff”, *Eng Geol*, Vol.47(1-2):175-187, (1997).
- [19] Chigira M., Nakamoto M. and Nakata E., “Weathering mechanisms and their effects on the landsliding of ignimbrite subject to vapor-phase crystallization in the Shirakawa pyroclastic flow, Northern Japan”, *Eng Geol*, 66:111-125, (2002).

- [20] Entwisle D.C., Hobbs P.R.N., Jones L.D., Gunn D. and Raines M.G., "The relationships between effective porosity, uniaxial compressive strength and sonic velocity of intact Borrowdale volcanic group core samples from Sellafield", *Geotech Geol Eng*, 23:793-809, (2005).
- [21] Emir E., Konuk A. and Daloğlu G., "Strength enhancement of Eskisehir tuff ashlar in Turkey", *Constr Build Mater*, 25(7):3014-3019, (2011).
- [22] Pola A., Crosta G.B., Fusi N., Barberini V., Norini G. and Pola Villasenor A., "Influence of alteration on physical properties of volcanic rocks", *Tectonophysics*, 566-567:67-86, (2012).
- [23] Palchik V., "Influence of porosity and elastic modulus on uniaxial compressive strength in soft brittle porous sandstones", *Rock Mech Rock Eng*, 32(4):303-309, (1999).
- [24] Vásárhelyi B., "Influence of the water saturation on the strength of volcanic tuffs", *ISRM International Symposium - EUROCK 2002*, November 25 - 27, 2002; Madeira, Portugal, (2002).
- [25] Palchik V. and Hatzor Y.H., "The influence of porosity on tensile and compressive strength of porous chalk", *Rock Mech Rock Eng*, 37(4):331-341, (2004).
- [26] Kahraman S., Gunaydin O. and Fener M., "The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load index", *Int J Rock Mech Min Sci*, 42(4):584-589, (2005).
- [27] Vasarhelyi B. and Van P., "Influence of Water Content on the Strength of Rock", *Eng Geol*, 84:70-74, (2006).
- [28] Ju Y., Yang Y.M., Song Z.D. and Xu W.J., "A statistical model for porous structure of rocks", *Sci China Ser E*, 51:11:2040-2058, (2008).
- [29] Nimmo J.R., "Porosity and pore size distribution". in: Hillel D, ed. *Encyclopedia of soils in the Environment*, London: Elsevier, 3:295-303, (2004).
- [30] Fakhimi A. and Alavi Gharahbagh E., "Discrete element analysis of the effect of pore size and pore distribution on the mechanical behavior of rock", *Int J Rock Mech Min Sci*, 48(1):77-85, (2011).
- [31] Ritter H.L. and Drake L.C., "Pore-size distribution in porous materials: pressure porosimeter and determinations of complete macropore-size distribution", *Ind Eng Chem Anal Ed*, 17:782, (1945).
- [32] Pickell J.J., Swanson B.F. and Hickman W.B., "Application of air mercury and oil-air capillary pressure data in the study of pore structure and fluid distribution", *Soc Petrol Eng J*, 237:55-61, (1966).
- [33] Klavetter E.A. and Peters R.R., "An evaluation of the use of mercury porosimetry in calculating hydrologic properties of tuffs from Yucca Mountain, Nevada", *SAND86-0286*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, (1987).
- [34] Vogt G.T., "Porosity, pore-size distribution and pore surface area of Apache Leap Tuff near Superior, Arizona using mercury intrusion", Unpublished master's thesis, *Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona*, Tucson, 130 p. (1988).
- [35] Nwaubani S.O., Mulheron M., Tilly G.P. and Schwamborn B., "Pore-structure and water transport properties of surface-treated building stones", *Mater Struct*, 33:198-206, (2000).
- [36] Roels S., Elsen J., Carmeliet J. and Hens H., "Characterisation of pore structure by combining mercury porosimetry and micrography", *Mater Struct*, 34(2):76-82, (2001).
- [37] Schoelkopf J., Gane P.A.C., Ridgway C.J. and Matthews G.P., "Practical observation of deviation from Lucas-Washburn scaling in porous media", *Colloid Surface Physicochem Eng Aspect*, 206:445-454, (2002).
- [38] Yang C.C. and Chiang C.T., "On the relationship between pore structure and charge passed from RCPT in mineral-free cement-based materials", *Mater Chem Phys*, 93(1):202-207, (2005).
- [39] Šperl J. and Trčková J., "Permeability and porosity of rocks and their relationship based on laboratory testing", *Acta Geodyn Geomater*, 5(149):41-47, (2008).
- [40] Angeli M., Benavente D., Bigas J.P., Menéndez B., Hébert R. and David C., "Modification of the porous network by salt crystallization in experimentally weathered sedimentary stones", *Mater Struct*, 41(6):1091-1108, (2008).
- [41] García-Del-Cura M.A., Benavente D., Martínez-Martínez J. and Cueto N., "Sedimentary structures and physical properties in travertine and carbonate tufa building stone", *Constr Build Mater*, 28:456-467, (2012).
- [42] Vacchiano C.D., Incarnato L., Scarfato P., Acierno D., "Conservation of tuff-stone with polymeric resins", *Constr Build Mater*, 22(5):855-865, (2008).
- [43] Anselmetti F.S., Luthi S. and Eberli G.P., "Quantitative characterization of carbonate pore systems by digital image analysis", *AAPG Bulletin*, 82(10):1815-1836, (1991).
- [44] Abell A.B., Willis K.L. and Lange D.A., "Mercury Intrusion porosimetry and image analysis of cement-based materials", *J Colloid Interf Sci*, 211:39-44, (1999).
- [45] Atzeni C., Sanna U. and Spanu N., "Some mechanisms of microstructure weakening in high-porous calcareous stones", *Mater Struct*, 39:525-531, (2006).
- [46] Lu S., Landis E.N. and Keane D.T., (2006) "X-ray microtomographic studies of pore structure and permeability in Portland cement concrete", *Mater Struct*, 39:611-620,
- [47] Loucks R.G., Reed R.M., Ruppel S.C. and Jarvie D.M., "Morphology, genesis and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett shale", *J Sediment Res*, 79:848-861, (2009).
- [48] De La Fuente S., Cuadros J., Fiore S. and Linares J., "Electron microscopy study of volcanic tuff alteration to illite-smectite under hydrothermal conditions", *Clays Clay Miner*, 48:339-50, (2000).
- [49] Liu C., Shi B., Zhou J. and Tang C., "Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: application on SEM images of clay materials", *Appl Clay Sci*, 54(1):97-106, (2011).
- [50] Giesche H., "Mercury porosimetry: A general (Practical) overview", *Part Syst Char*, 23:1-11, (2006).
- [51] Klobes P., Meyer K., Munro R.G., "Porosity and specific surface area measurements for solid materials", *NIST Recommended Practice Guided*, Special Publication, 960-17, (2006).



- [52] Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L., Pierotti R.A. and Rouquerol Jemieniewska T., “Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity”, *Pure Appl Chem*, 57(4):603-619, (1985).
- [53] Ergül A., “Investigation of the effect on physico-mechanic characteristics of the water content dependent upon porosity in the tuffs used as a building stone in Afyonkarahisar”, Master of Science Thesis, *Afyon Kocatepe University, Graduate School of Natural and Applied Science, Mining Engineering Department*, 117p. (Unpublished). (2009).
- [54] Webb P.A. and Orr C., “Analytical methods in fine particle technology”, *Micromeritics Instrument Corporation, Norcross*, 303 p. (1997).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

# Experimental and numerical analysis of a CFRP strengthened steel-concrete composite beam

*Yazar(lar) (Author(s)): Emre ERCAN<sup>1</sup>, Bengi ARISOY<sup>1</sup>, Emin HÖKELEKLİ<sup>2</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-9325-8534*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-2785-0609*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-0548-5214*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Ercan E., Arısoy B. ve Hökeleklİ E., “Experimental and numerical analysis of a CFRP strengthened steel-concrete composite beam”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 113-121, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.385920

# Experimental and Numerical Analysis of a CFRP Strengthened Steel-Concrete Composite Beam

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Emre ERCAN<sup>1\*</sup>, Bengi ARISOY<sup>1</sup>, Emin HÖKELEKLİ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Ege University, İzmir, Turkey

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Bartın University, Bartın, Turkey

(Geliş/Received : 10.01.2017 ; Kabul/Accepted : 28.04.2017)

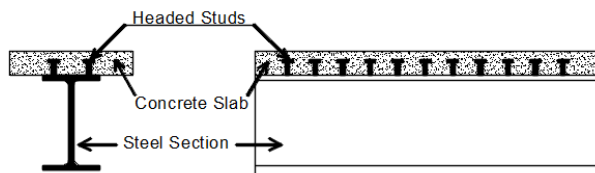
## ABSTRACT

In this study, experimental and nonlinear finite element analysis of strengthened steel-concrete composite beams is presented. A steel-concrete composite beam is produced by using a steel beam and concrete slab bonded each other with shear connectors. Strengthening is applied by Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) sheets to the lower flange of the steel beam. Three samples are prepared, one of them is considered as a reference sample, the other two are strengthened by CFRP sheets with different number of layers. In experimental study, steel-concrete composite beams were tested by 4-point bending test with cyclic loading. During the test, load, deflection, and strain values are measured. Then 3D finite element models of the steel-concrete composite beams are prepared using tetrahedral elements. Finite element analysis is performed by using ATENA nonlinear analysis program. The results of experiments and finite element analysis are compared. Results indicated that the strengthened steel-concrete composite beams have larger moment capacity, lower deflection than the steel-concrete composite beam sample. Some evaluations are made on especially in terms of strength, applicability, stiffness and energy consumption about the steel-concrete composite beams with CFRP. Experimental results are found similar to the results obtained by nonlinear finite element method.

**Keywords:** CFRP, strengthened steel-composite beam, 4-point loading test, FEM High speed processing of ferrous or non-

## 1. INTRODUCTION

The bearing system mentioned that produced as a result of merging reinforced concrete slabs and the steel beams with shear elements (shear connectors) is called a steel-concrete composite beam (Figure 1). These systems are more economical than steel beams that bear alone the concrete slab that sits freely on them. This is because in steel-concrete composite beams the tension component of the force pair originating from bending is carried by the steel profile, and the compressive component is carried only by the concrete slab or jointly with upper portion of the steel beam. Therefore, a steel profile that is weak against buckling is relieved entirely or to a large extent from carrying the compressive component of bending.



**Figure 1.** Typical steel-concrete composite beam [2]

Two types of steel-concrete composite beams can be fabricated, fully and partially; a fully-composite beam

has a sufficient number of shear connectors (headed studs) that prevent the slip between the concrete and steel

beam after concrete crushing and steel beam yielding. In a partially steel-concrete composite beam, shear connectors fail before the concrete crushing under compression and the slip between the concrete and steel beam would occur [1,2]. The performance of the steel-concrete composite beams is depending on the capacity of the shear members between the reinforced concrete slab and the steel beam [3].

Steel-concrete composite beams have been used as main structural members in flexure for bridges and building constructions. The maximum load and moment capacity of steel-concrete composite beams under bending moment can be improved by applying Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) to lower flange of the steel beam. Strengthening of steel-concrete composite beams include: increasing the load-carrying capacity and the resistance to withstand underestimated loads; preventing failure due to inadequate detailing; recovering lost load carrying capacity due to degradation caused by aging or corrosion [4-7]. The problem in strengthened with CFRP is de-bonding of CFRP from strengthened members. De-bonding takes place in high stress concentration regions due to cracks. There are two main de-bonding failure modes between steel and CFRP, intermediate de-bonding due to yielding of steel and, plate end de-bonding [8]. In the literature, there are many studies associated with steel-concrete composite beams. Studies are typically based on strengthening concrete and steel with a variety of materials. Some of the studies are summarized below: Teng et al [9], investigated strengthened steel-concrete composite beams with CFRP under bending experimentally and numerically. In the study they exhibited increase in moment capacity and the location

\*Corresponding Author (Sorumlu yazar)  
e-posta : emre.ercan@ege.edu.tr

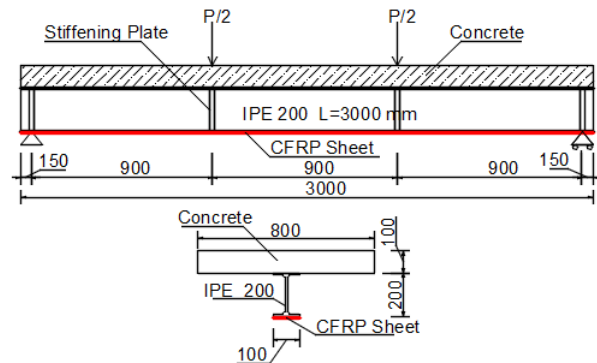
of de-bonding between CFRP sheets and steel under heavy loads. El-Shihy et al. [10], conducted an experiment and a nonlinear FEM analysis on the behavior of steel-concrete composite beams strengthened in hogging moment region with CFRP sheets. Experimental results showed strengthening steel-concrete composite beams with concrete slab with CFRP sheets with one and two layers increased the load carrying capacity of the beam by 15% and 21%, respectively. The stress at the edge of the CFRP sheets are found higher than those at its center and the difference increases as the CFRP sheet width increases due to a shear lag effect in the concrete substrate. They conduct nonlinear FEM analyses on ABAQUS and the FEM results of capacity load-deflection curves were calculated higher than experimental results. Pecce et.al. [11], investigated the rotational capacity of steel-concrete composite beams, for seismic design of composite frames and the effects of various parameters on the available plastic rotation. Lin et. al. [12], described the fatigue behavior of steel-concrete composite beams under negative bending moment. They performed fatigue tests with repeated load limited to stabilized cracking and initial cracking on two steel-concrete composite beams. They observed that when the repeated load was chosen to the initial cracking load, the fatigue test had very small influence on stiffness of the steel-concrete composite beam. However, when the repeated load was chosen equivalent to the stabilized cracking load, a number of residual cracks occurred in the initial static test and the beam lost stiffness as the load cycles increase. If the repeated load had been chosen larger than the initial cracking load, stiffness and ultimate load carrying capacity of beam would be decreased. Sallam et. al. [8], investigate the effect of pre-intermediate separation on the flexural behavior of strengthened steel-concrete composite beams retrofitted by CFRP and showed the intermediate de-bonding started growing after yielding of the steel flange. Değerli [13] investigated shear members of the steel-concrete composite beams. He used bolts as shear connectors and investigated the composite working status, the scraping status of the slab and the effect of placement of bolts at different intervals on the transportation strength and crack formation experimentally. It was confirmed that the bolts are very good slip coupling elements. In the study conducted by Ağcakoca and Aktaş [14], it was aimed to determine the necessary CFRP amount to ensure designed behavior in reinforced steel-concrete composite beams. They obtained reinforced beams by applying a High Modulus-CFRP strip to the bottom flange of the steel beam that was forming a composite profile and the beam was subjected to a 4-point loading test. The collapse occurred with the rupture of HM-CFRP strips. In the study conducted by Özyılmaz [15] the effect of CFRP sheets on steel-concrete composite beams studied experimentally under 4-point loadings tests.

In this study experimental and nonlinear finite element analysis of strengthened steel-concrete composite beams are presented. In experimental study, steel-concrete

composite beams were tested by 4-point bending test with cyclic loading. Load, deflection, and strain values are measured. Then 3D finite element models of the steel-concrete composite beams are prepared and analyzed. The experimental and analytical results were compared. Significant feature of the study is to exhibit efficiency and applicability of strengthening.

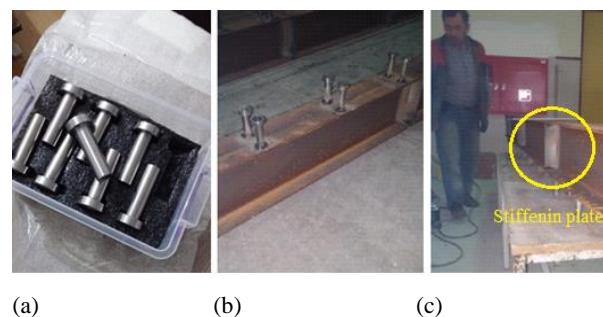
## 2. EXPERIMENTAL STUDY

The steel-concrete composite beams with a length of 3m and a span of 2.70 m are tested in 4-point bending test. The beam has two parts steel beam and concrete slab. These two parts connected each other by studs. The concrete slab is 10mm deep and 800mm wide, with one layer of Q131/131 steel web. The concrete used is C25. The steel beam used is S275 IPE-200. The schematic view of the steel-concrete composite beam is shown in Figure 2.



**Figure 2.** Drawing of test specimen steel-concrete composite Beam

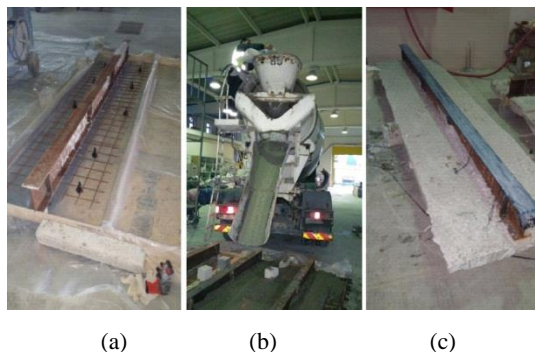
Connection between concrete slab and steel beam was provided by studs. In total, 22 shear steel studs (Figure 3-a) were used. The steel beam with welded studs is shown in Figure 3-b. Stiffening plates (Figure 3-c) were welded to the web of IPE 200 profile from both sides of the web at the support and at the points where the load would be applied.



**Figure 3.** Headed studs and stiffening Plates [15]

100×800×3000 mm concrete molds were prepared (Figure 4-a), welded wire fabric was placed 25 mm deep from surface of the concrete slab. Welded wire fabric

type is chosen as Q131/131, and concrete casting was completed by trans-mixer (Figure 4-b and Figure 4-c).



**Figure 4.** Mold, concrete casting and CFRP strengthened steel-concrete composite beam.

In experimental study, three types of steel-concrete composite beams prepared and have been tested. One of the samples is considered as control sample that is simple steel-concrete composite beam without retrofitting (CBWOCFRP). The other two are steel-concrete composite beams strengthened with two layers of CFRP sheets at lower flange of I shaped steel profile (CBW2CFRP) and strengthened with three layers of CFRP sheets at lower flange of I shaped steel profile (CBW3CFRP). The samples were tested for 4-point bending test under cyclic load. CFRP sheets are bonded to the lower flange of the IPE 200 (Figure 4-c). The strengthening procedure includes removing rust from steel with sand blasting, and cleaning by acetone to ensure good and strong bonding. CFRP sheets were bonded by applying priming adhesive layer Sikadur 330 then by applying SikaWrap 300C. In order to avoid air pockets or irregularities, sheets were located onto the epoxy coating and were pressed diligently. This process was continued until the resin was squeezed out between the roving of the fabric. It should be noted that additional epoxy resin was spread on after applying the previous layer. The application implemented two layers for specimen CBW2CFRP and three layers for CBW3CFRP specimens. CFRP applications were carried out at room temperature and all specimens were cured for at least 28 days before testing.

**2.1. Mechanical Properties of Concrete**

The C25 concrete mixtures were prepared in the factory and brought to the laboratory by a trans-mixer. Cube and cylindrical samples were taken while concrete casting and tested on the same day with steel-composite beams were tested. Compressive strength of concrete was determined by uni-axial compression tests on 150 mm dimensional cube samples according to TS EN 12390-3 standard. The rate of loading was set as 6.8 kN/s. Tensile strength of the concrete was determined by splitting tensile strength test on cylindrical samples with 100 mm diameter and 200 mm height according to TS EN 12390-6 standard and the rate of loading was set as 3 kN/s. Modulus of elasticity test was carried out on 100 mm

dimensional cube samples. [16,17]. The results of the tests are given in Table 1.

**Table 1.** Mechanical properties of concrete

Concrete of sample	Uniaxial strength (MPa)	Splitting tensile strength (MPa)	Modulus of Elasticity (MPa)
CBWOCFRP	28.26	2.8	30026
CBW2CFRP	29.3	2.8	29896
CBW3CFRP	29.3	2.8	29996

**2.2. Mechanical Properties of CFRP and Steel Beam**

Carbon fiber sheets used for strengthening of the steel-concrete composite beam is SikaWrap 300C and bonding resin used is epoxy Sikadur 330. Mechanical properties of CFRP and the epoxy resin are presented in Table 2.

**Table 2.** Mechanical properties of CFRP

Properties of unidirectional CFRP	Remarks of SikaWrap 300C
Fiber orientation	0°
Areal weight (g/m2)	300±10
Density (g/m3)	1.78x10-6
Thickness (mm)	0.166
Tensile strength (MPa)	3.900
Elastic modulus (MPa)	230.000
Ultimate tensile strain (%)	1.5%

**Table 2.** Mechanical properties of Epoxy

Properties of resin	Remarks of Sikadur 330
Tensile strength (MPa)	30
Elastic modulus (MPa)	3800
Properties of Lamina (1 mm for each layer)	Remarks of Sika
Elastic modulus (GPa)	33

Steel profile used as a part of the steel-concrete composite beam is IPE200 with 275 MPa yielding and 410 MPa ultimate strength capacity steel beam. Elasticity modulus of the steel is 200 GPa. The Yield strain  $\epsilon_y$  (mm/mm) and ultimate strain  $\epsilon_u$  (mm/mm) values are 1900  $\mu\epsilon$  and 350000  $\mu\epsilon$ , respectively.

**2.3. Experimental Setup**

The 3 meter beam was loaded as in Figure 5 in the 4-point loading test. The 500 kN load capacity load cell was used. Deformations were measured by displacement meters and strains were measured by strain gauges. A total of three displacement meters were placed to the 1/4 and 1/2 of the beam. Strain-gauges were placed on the upper and lower flanges of the middle of the IPE 200 profile to measure the max strain values. Thus, the yielding was easily identified when it would occur. Location of displacement meters and strain gauges are shown in Figure 5, as well. Load value was obtained with the help of the 500kN load cell. The data that came from all these sensors were transferred to the computer with the Testbox1001 data acquisition system which has a sampling rate 8 S/s. The load and strain values were

transferred to the computer by National Instruments 9237 24bit data acquisition system. The cyclic loading was increased 25 kN in each cycle. Incremental cyclic loading was continued until the failure of the beam.

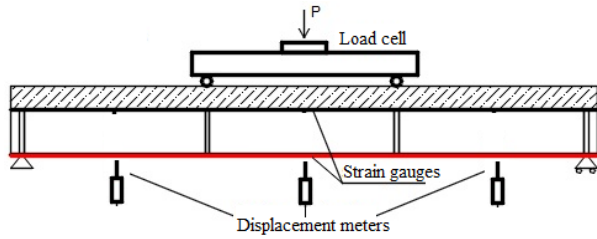


Figure 5. Schematic view of test set-up.

Testing is shown in Figure 6.



Figure 6. Steel-concrete composite beam test set-up

#### 2.4. FEM Model of the Steel-concrete composite beams

FEM model of the steel-concrete composite beam was prepared in the ATENA-GiD program [18] that is a new generation stress analysis program specially designed for concrete, which makes it easier for the user since default values given for concrete are designed considerably well. In addition to that in case of serious cracking occurrence in concrete, in FEM analysis, the convergent is reached. The bonding between concrete and steel beam is constituted via “fixed contact” as explained in ATENA program documentation Part 4-6 [19] to ensure fully steel-concrete composite beam model. The finite element model of the control beam consists of 32958 tetrahedral elements 89 line elements and 9598 nodes (Figure 7). CFRP are assigned as linear elements to the flange of the steel beam as explained in the Atena program documentation part 4-9 and 11 for CFRP strengthened model [19]. The strengthened beam models have 300 additional line elements and 315 nodes that represent CFRP (Figure 8). The material properties of concrete obtained as a result of the tests were added to the program. Material properties given by the manufacturers were used for steel and CFRP material. Displacement values obtained in the experimental results are given as input data for the nonlinear FEM model.

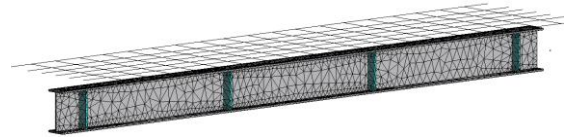


Figure 7. FEM model of the steel-concrete composite beam

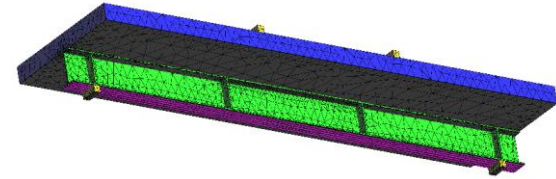


Figure 8. FEM model of the CFRP strengthened steel-concrete composite beam

### 2.5. Experimental Results and Evaluation

#### 2.5.1. Control sample (CBWOCFRP)

Load-deflection, Strain-time and Load-time graphs of control sample (CBWOCFRP) steel-concrete composite beam are given in Figure 9 and 10. Under cyclic loading, permanent deformations occurred after the 9th load cycle at 225 kN (Figure 9). The first micro shear cracks occurred in the 7<sup>th</sup> load cycle at 175 kN at the points where the load was impacted. Yielding in the composite beam was observed at the 325 kN load and after that deflections increased (Figure 10 and 11) and shear cracks expanded rapidly in the region near the area of the load implementation of concrete slab (Figure 12). Brittle fracture in steel-concrete composite beam was not observed until the failure of the system.

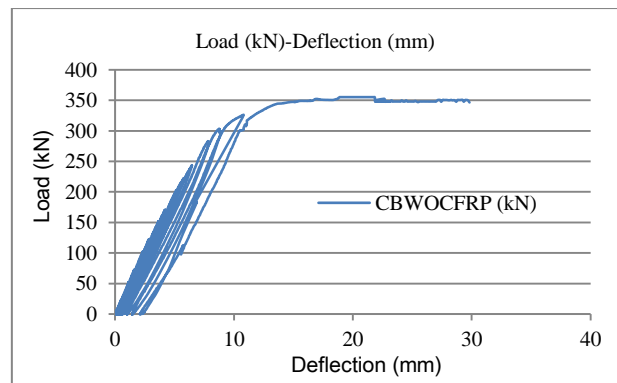
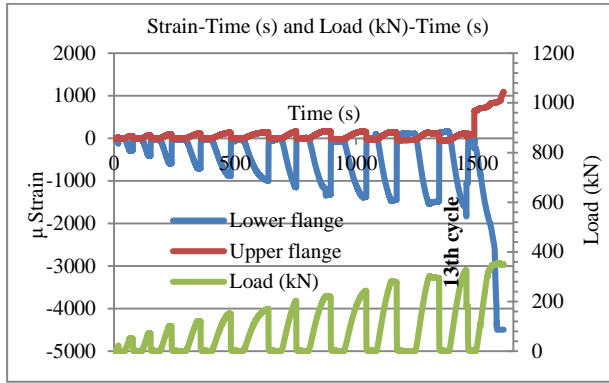


Figure 9. Incremental cyclic load-deflection graph of CBWOCFRP sample



**Figure 10** Strain-time and Load-time graphs of CBW0CFRP sample



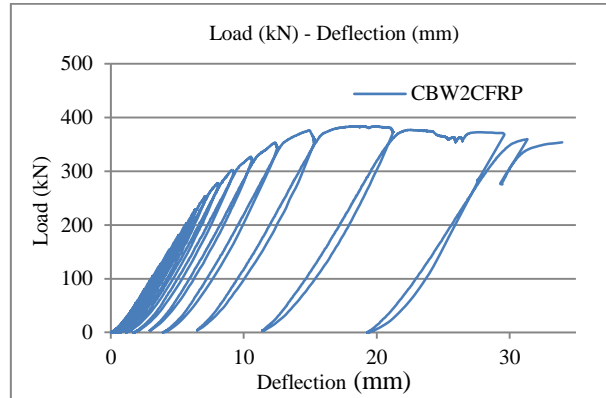
**Figure 11.** Deformed shape of the CW0CFRP sample



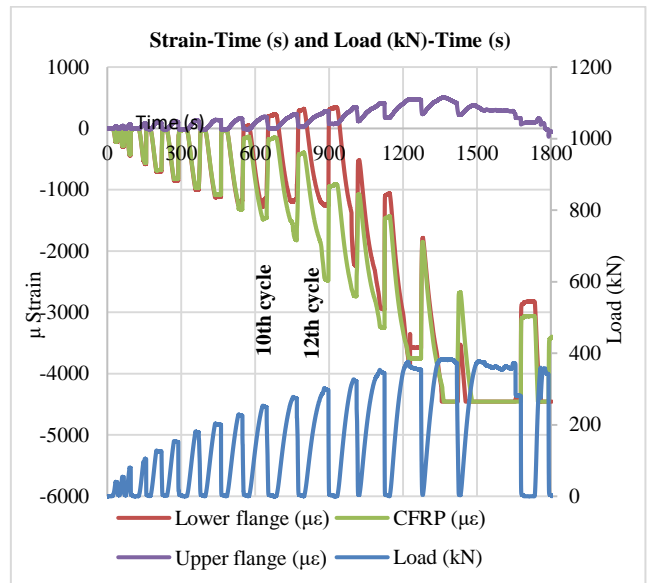
**Figure 12.** Shear cracks of the CW0CFRP sample

### 2.5.2. Sample strengthened with two layers CFRP (CBW2CFRP)

Load-deflection, Strain-time and Load-time graphs of CBW2CFRP steel-concrete composite beam are given in Figure 13 and 14. Permanent deformations occurred after the 10<sup>th</sup> load cycle at 250 kN and the rigidity of the system and slope of the load-displacement curve began to decrease slowly. Also the bonding between CFRP and steel begin to lose as seen from the Figure 15, at about 10<sup>th</sup> cycle. In Figure 16 the strain value of lower flange of the steel exceeds 1900  $\mu\epsilon$  which is yielding strain value of steel this shows the CFRP cannot prevent the yielding of steel because of insufficient proportion. When the CFRP sheet near the edges begins to rupture, the strain value of the mid CFRP increased. A significant yielding in the system was observed at the 380 kN (Figure 13) load also at this load the CFRP was ruptured with a noise at edges (Figure 15), this was followed by increase in deflection. Shear cracks expanded suddenly in the region near the area of the load implementation and the concrete slab crushed (Figure 16). Brittle fracture in concrete was not observed until the failure of the system. The deformed sample is presented in Figure 17.



**Figure 13.** Incremental cyclic load-deflection graph of CBW2CFRP sample



**Figure 14.** Strain-time and Load-time graphs of CBW2CFRP sample



**Figure 15.** Rupture at edges and de-bonding of CFRP from steel in CBW2CFRP sample



Figure 16. Shear cracks near the loading point



Figure 17. Deformed shape of the strengthened sample

### 2.5.3. Sample strengthened with three layers CFRP (CBW3CFRP)

Load-deflection, Strain-time and Load-time graphs of CBW3CFRP steel-concrete composite beam are given in Figure 18 and 19. Permanent deformations clearly happened after the 11<sup>th</sup> load cycle at 275 kN and the rigidity of the system and slope of the load-displacement curve began to decrease. The bonding between CFRP and steel begin to lose at 12<sup>th</sup> cycle 300kN as seen from the Figure 18. Also the first capillary shear cracks occurred in the points where the load was impacted. From Figure 19 it is seen that the yielding of the steel lower flange was prevented by CFRP and the strain value of the steel was limited although the separation of CFRP from steel is occurred at mid-span. This is because the CFRP is implemented entirely under lower flange and anchored from support points. However after 14<sup>th</sup> cycle when the load is removed, compression strain is observed on steel flange and tension strain observed on CFRP. This is because after plastic deformation of the system the lower steel flange of the steel-concrete composite beam elongates and because CFRP is not ruptured and still in it is in elastic region it applies tension to the lower steel flange. A significant yield in the beam was observed at the 476 kN. After yielding, the amount of deflection

increased and shear cracks expanded suddenly in the region near the area of the load implementation and the concrete slab crushed (Figure 20). And load carrying capacity of the beam decreased to 350 kN but still can carry load.

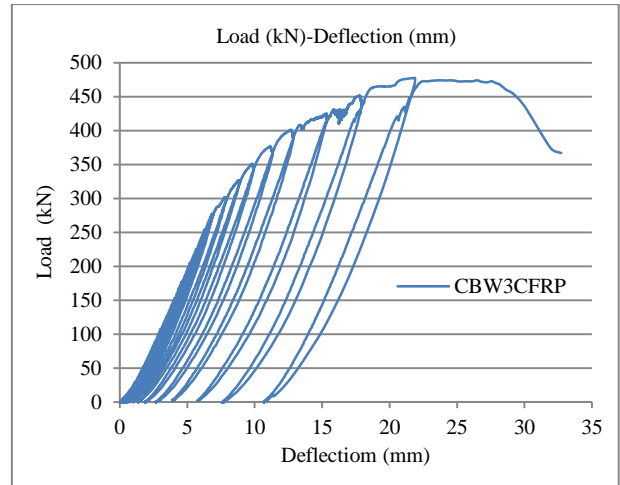


Figure 18. Incremental cyclic load-deflection graph of CBW3CFRP sample

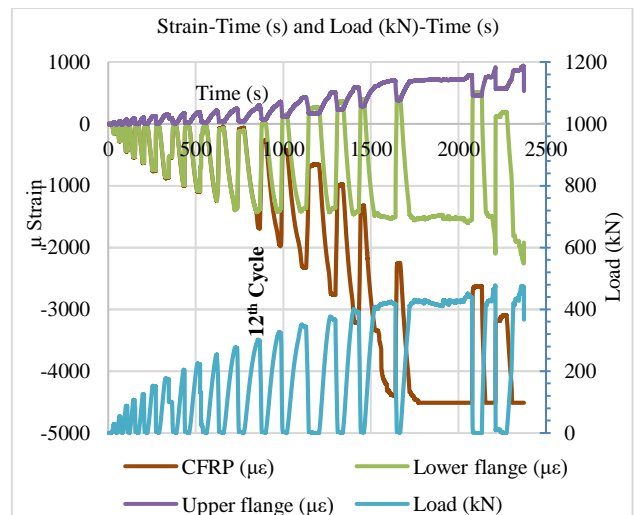


Figure 19. Strain-time and Load-time graphs of CBW3CFRP sample



Figure 20. Concrete crushing and deflection of CBW3CFRP sample

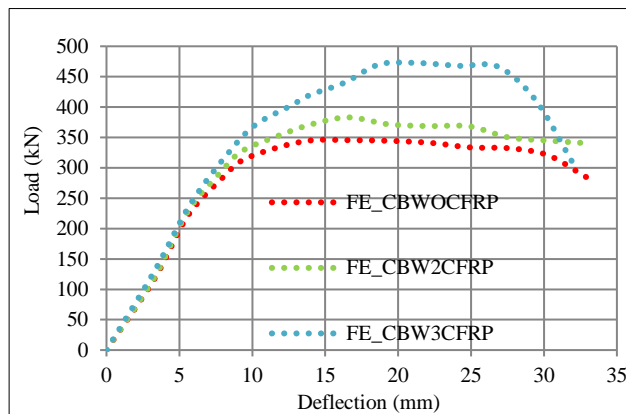
All the samples exhibited considerably high ductile behavior, as expected. Failure of the control sample without strengthening was depending failure of concrete



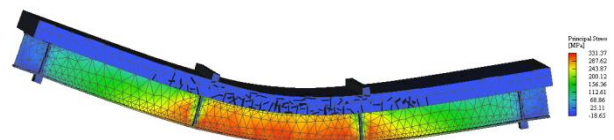
slap. Yielding of the steel beam followed by concrete crush was occurred, because the steel beam did not have strength to reverse the deformation in concrete slab. On the other hand, yielding capacity was increased due to CFRP, although the concrete slab was crashed, steel beam had capacity reverse the deformation, and exhibited larger load carrying capacity and ductility.

**3. FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE STEEL-CONCRETE COMPOSITE BEAM**

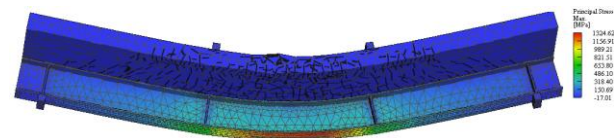
The finite element models for the steel-concrete composite beam given in Section 2.4 were analyzed. The maximum deflection-total load value graph was obtained from the analyses and is presented in Figure 21 for three models. The crack map and principle stress contour graphs obtained for non-strengthened and strengthened steel-concrete composite beams and the stress distribution are given in Figures 22, 23 and 24.



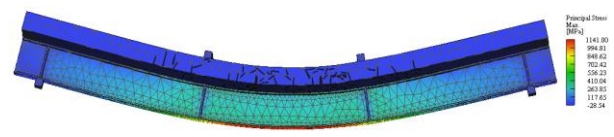
**Figure 21.** Load-deflection curves obtained from ATENA-GID FEM program



**Figure 22.** Principle stress contour and cracks in un-strengthened steel-concrete composite beam (CBWO CFRP)



**Figure 23.** Principle stress contour and cracks in strengthened with two layers of CFRP steel-concrete composite beam (CBW2 CFRP)

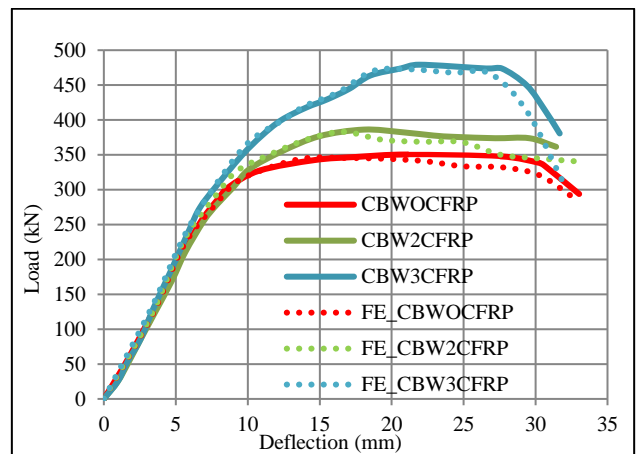


**Figure 24.** Principle stress contour and cracks in strengthened with three layers of CFRP steel-concrete composite beam (CBW3 CFRP)

**4. RESULTS AND DISCUSSION**

The comparison of experimental and finite element analysis is given in Figure 25. The linear regions of the load-deflection graphs for experiment and nonlinear FEM analysis are overlapped. The maximum load of the experimental and FEM analysis results are similar. The reason for increase in rigidity is that the modulus of elasticity of CFRP is 230 GPa and of steel is 200 GPa. The bonding between steel beam and CFRP sheet was provided well, so that these two materials worked together, result in increase in load carrying capacity of the steel-concrete composite beam. A detailed comparison of the results is presented in Table 3 and Table 4.

The CFRP sheets bonded entirely on lower flange and anchored at support points if this was not implemented the CFRP will de-bonded entirely from the steel due to yielding of steel. Nonlinear FEM model and experimental results show good agreement. Bonding the CFRP sheets entirely to the steel flange has an advanced not to fail although de-bonding occurs and the system carry the load. But this time concrete crushing occurred so the compressive strength of the concrete must also be increased. If CFRP is used for strengthening in composite structures concrete must also strengthened by increasing slab height.



**Figure 25.** Load-deflection curves obtained from numerical model and experimental study

**Table 3.** Comparison of experimental results

Property	CB WO CFRP	CB W2 CFRP	CB W3 CFRP
First Crack Load (kN)	175	200	200
First permanent deformation load (kN)	225	250	275
Yielding Load (kN)	325	380	470

Maximum Load	350	383	474
Increase ratio of maximum load (%)	-	9.4	35.4
Failure Type	yielding	yielding	yielding

**Table 4.** Comparison of FEM results

Property	FEM CB WOCFRP	FEM CB W2CFRP	FEM CB W3CFRP
First Crack Load (kN)	180	190	190
Yielding Load (kN)	375	380	470
Maximum Load (kN)	350	380	470
Increase ratio of maximum load (%)	-	8.5	34
Failure Type	yielding	yielding	yielding

## 5. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Flexural capacity of the steel-concrete composite beams is controlled by bottom flange of the steel section and concrete slab. Increasing tension force capacity in where the tension is effected provides better flexural strength. In this study, tension region of steel-concrete composite beam (bottom flange of steel beam) is strengthened using carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheet in order to have better flexural behavior. Both the steel-concrete composite beam and CFRP strengthened steel-concrete composite beam are analyzed both analytically and experimentally. Results of the analyses exhibited that the reasonable increase in flexural behavior capacity is possible if certain amount of CFRP applied. According to results of experimental and numerical studies, following conclusions and recommendations are made.

Experimental and numerical results of the steel-concrete composite beams have given the similar flexural stiffness in the linear region of load-displacement curve, because the elasticity modulus of steel and CFRP are close to each other, and cross section proportion of CFRP is small according to steel.

Although CFRP have a small effect on stiffness, load carrying capacity of the beams increased 8.5 % and 34 % for CBW2CFRP and CBW3CFRP samples, respectively. Increasing the number of layers of CFRP will increase the maximum load. Hence, shear strength of the beam which is compensated by web of the steel beam should be taken into account.

Regarding failure modes, flexural capacity and failure of the beam are controlled by CFRP. The failure occurred after yielding of the steel beam, delamination between steel bottom flange and CFRP, rupturing of the CFRP and concrete crushing, respectively. On the other hand, because of existence of the structural steel beam, even after concrete crushed, the beam still has capacity to carry load. Because of high proportion of CFRP in CBW3CFRP sample and by providing very good CFRP/steel bonding at the support region, the tension

stresses transferred to the steel beam from CFRP completely in the middle section of the beam.

For FEM modeling, embedding CFRP as linear elements into the steel simulates maximum loading capacity very well, however, delamination cannot be seen. For this reason, if there is no delamination this is a good solution for CFRP FEM modeling.

## ACKNOWLEDGEMENT

Authors would like to thank Mr. Barış KURAL, Mr. Sahir CİLLO and Mr. Selçuk ORAL for their support during the experimental study.

## REFERENCES

- [1] Arda T.S. and Yardımcı N., “Çelik Yapıda Karma Elemanların Plastik Hesabı”, Birsen Yayınevi, İstanbul, (2000).
- [2] “Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları”, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, (2016).
- [3] Price A.M. and Anderson D., “Const steel design Part 4”, Composite beams, *Elsevier Applied Science*, (1992).
- [4] Tavakkolizadeh M. and Saadatmanesh H., “Strengthening of steel-concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymers sheets”, *Journal of Structural Engineering, ASCE* 129(1): 30-40, (2003).
- [5] Fam A., MacDougall C. and Shaat A., “Upgrading steel-concrete composite girders and repair of damaged steel beams using bonded CFRP laminates”, *Thin-Walled Structures*, 47(10): 1122-1135, (2009).
- [6] Al-Saidy A.H., Klaiber F.W., Wipf T.J., Al-Jabri K.S. and Al-Nuaimi, A.S., “Parametric study on the behavior of short span composite bridge girders strengthened with carbon fiber reinforced polymer plates”, *Construction and Building Materials*, 22:729-737, (2008).
- [7] Rizkalla S., Dawood M. and Scherch D., “Development of a carbon fiber reinforced polymer system for strengthening steel structures”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(2): 388-397, (2008).
- [8] Seleem M.H., Sharaky I.A. and Sallam H.E.M., “Flexural behavior of steel beams strengthened by carbon fiber reinforced polymer plates three dimensional finite element simulation”, *Materials & Design*, 31(3): 1317-24, (2010).
- [9] Teng J. G., Fernando D. and Yu T., “Finite element modeling of bonding failures in steel beams flexural strengthened with CFRP laminates”, *Engineering Structures*, 86: 213-224, (2015).
- [10] El-Shihy A.M., Fawzy H.M., Mustafa S.A. and El-Zohairy A.A., “Experimental and numerical analysis of composite beams strengthened by CFRP laminates in hogging moment region”, *Steel and Composite Structures*, 10(3): 281-295, (2010).
- [11] Pecce M., Rossi F., Bibbò F.A. and Ceron F., “Experimental behavior of composite beams subjected to a hogging moment”, *Steel and Composite Structures*, 12(5): 395-412 395, (2012).
- [12] Lin W., Yoda T. and Taniguchi N., “Fatigue tests on straight steel-concrete composite beams subjected to hogging moment”, *Journal of Constructional Steel Research*, 80: 42-56, (2013).
- [13] Değerli A., “Bulonlar ile birleştirilmiş kompozit kirişlerin negatif moment bölgesindeki yapısal davranışları”,

- Master's Thesis*, Sakarya University, Institute of Science and Technology, (2012).
- [14] Ağcakoca E., and Aktaş M., "HM-CFRP ile güçlendirilmiş kompozit I-kirişlerde HM-CFRP'nin sıyrılmaması için faydalı mesafenin belirlenmesi", *E-Journal of New World Sciences Academy*, 7(2): 47-59, (2012).
- [15] Özyılmaz E., "Karbon Lifler İle Güçlendirilmiş Kompozit Kirişlerin Eğilme Ve Kesme Kuvveti Altında Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi", *Master's Thesis*, Ege University, Institute of Science and Technology, (2016).
- [16] Erdoğan T.Y., "**Beton**", Middle East Technican University Publishing, Ankara, Türkiye, (2013).
- [17] TS 500, "**Betonarme Yapuların Tasarım ve Yapım Kuralları**", (2000).
- [18] ATENA version 5.3, Červenka Consulting s.r.o., Prague, Czech Republic, 2016.
- [19] Pyl D., and Červenka J., ATENA Program Documentation, Červenka Consulting s.r.o., Prague, Czech Republic, 2016.



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

## Evaluation bandwidth of optical signal via statistical moments of random phase screen

*Author(s): Miranda KHAJISHVİLİ<sup>1</sup>, Nugzar GOMİDZE<sup>2</sup>, Izolda JABNİDZE<sup>3</sup>, Kakha MAKHARADZE<sup>4</sup>, Manana CHİKHLADZE<sup>5</sup>*

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-2827-7058

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-1750-6959

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-4471-4027

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0003-2504-5072

ORCID<sup>5</sup>: 0000-0003-4695-0899

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Khajishvili M., Gomidze N., Jabnidze I., Makharadze K. and Chikhladze M., "Evaluation bandwidth of optical signal via statistical moments of random phase screen", *Politeknik Dergisi*, 21(1): 123-128, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.379641

# Evaluation Bandwidth of Optical Signal via Statistical Moments of Random Phase Screen

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Miranda Khajishvili<sup>1\*</sup>, Nugzar Gomidze<sup>2</sup>, Izolda Jabnidze<sup>3</sup>, Kakha Makharadze<sup>4</sup>, Manana Chikhladze<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, Batumi Shota Rustaveli State University, Batumi, Georgia

<sup>2</sup> Department of Physics, Batumi Shota Rustaveli State University, Batumi, Georgia

<sup>3</sup> Department of Physics, Batumi Shota Rustaveli State University, Batumi, Georgia

<sup>4</sup> Batumi Referral Hospital, Batumi, Georgia

<sup>5</sup> Department of Physics, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia

(Received : 14.01.2017 ; Accepted : 16.02.2017)

## ABSTRACT

The majority of the works are dedicated to the specific problem, for instance, scattering from the rough surface although, the general theoretical bases of the statistical and spectral characteristics of the scattered light for the light of non-Gaussian statistics have not been studied so far. The signals with such statistics are produced when the characteristic scales of the refraction factor is in comparison with the size of illuminated region. In the present paper, we discuss the method of signal processing for analyzing first and second order statistical moments of electromagnetic radiation.

**Keywords:** Phase screen, laser radiation, statistical moments.

## 1. INTRODUCTION

The superhigh frequency range the analogical methods of signal processing are well known. Analogical methods were first applied in 1950s of the last century in visible part of the spectrum [1]. But since the laser sources of the spectrum have been invented the analogical methods were widely applied in spectroscopy as well. As for the numerical methods of signal processing, which are discussed in the present project, are one of the actual problems of modern society.

Nowadays, there is not a universal analytical method for solving such problems and therefore, we can get the information on the scattered radiation by applying the figural methods or from the experiment itself.

Via using lasers, an important light field can be made on large distances from the device and distance sounding to be carried out [2]. In short impulses ( $\approx 10^{-8}$ - $10^{-9}$  c) the light concentration enables us to do lab analyses without darkening (on the expenses of the receiver's gating). High spectral brightness of laser radiation provides the high sensibility of laser fluorometer and we can make an express-analysis of natural waters sample (some cm<sup>3</sup>) without their concentration, we can also register the Raman-scattering signal of water molecules and use it as a comparative signal - internal Rapper.

In the work [3] are presented graphics of spectrum samples of relative intensity of the fluorescence of Hexane, distilants, drinking water, sea water and oil extract taken by our modernized laser-spectroscopy equipment.

We can evaluate the fluctuations of light wave in the randomly inhomogeneous media by means fluctuations

of intensity and phase that is why, the statistic characteristics of the field are defined by the statistic characteristics of intensity and phase [4].

The source of the ray is laser equipment because phase screen is randomly inhomogeneous media. That is why, it is obvious that the inclination of the ray from the straight direction takes place. We should discuss the propagation of the ray in the randomly inhomogeneous media as a stochastic process, and we can use Einstein-Fokker-Kolmogorov's equation for an angular separation of rays [5].

The classification of wave phenomena is definitely connected to dynamic problem statement. Rather wide class of wave problems is formulated as following: say, the body (or system of bodies) covered with surface is placed in homogeneous or inhomogeneous media, in which the waves of this or that nature are propagated (electromagnetic, acoustic, flexible, spin waves, etc.). Respectively, indicate the linear, differential or integro-differential wave operator with  $\hat{L}$ . In the area of wave equation which is free from the wave sources, we will have the following expression [5].

$$\hat{L}u = 0,$$

Where,  $u$  - is a wave field, which may be scalar or vector. In case when it is vector, operator will be a tensor. The primary wave is created either with real sources, or virtual sources. For instance, the primary wave can be  $u = e^{i(kx - \omega t)}$ , which in most cases is a flat wave, and we have to find a scattered field. Besides the sources and scattering body shape certain boundary condition for limited surface of scattering body and the radiation condition are required (or the condition in infinity). In the determined task we would have primary field on the surface. The primary field statistics is determined only by the second order moment [6,7]

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

$$\Gamma_u^0(1,2) = \langle u_0(1)u_0^*(2) \rangle,$$

In optics it is called the function of the second order coherence. We may have the higher order moments of the primary field. Obviously, the complete statistic description of the  $u$  field is obtained through the densities of probability of  $n$  ( $n=1,2,\dots$ ) order. In the conditions of the given task, random can be: a) real  $q$  sources; b) virtual sources ( $u_0/S_0$ ; c)  $S$  boundary

form and condition; d) media property, i. e.  $\hat{L}$  operator itself. Of course, the problem statement does not imply the determination of the correspondent methods – approximate methods. Actually, the fluctuations of this or that parameter or function can be little and large, slow, fast or sharply expressed. Correlation can be strong or weak, and so on. This kind of differences of physical nature of tasks cause requires new methods and approaches. This is where the multiple secondary schemes are originated from, which are already connected not to the problem statement, but to their solvation. The multiplicity of the secondary schemes makes it difficult to orientate in the issues of wave statistics.

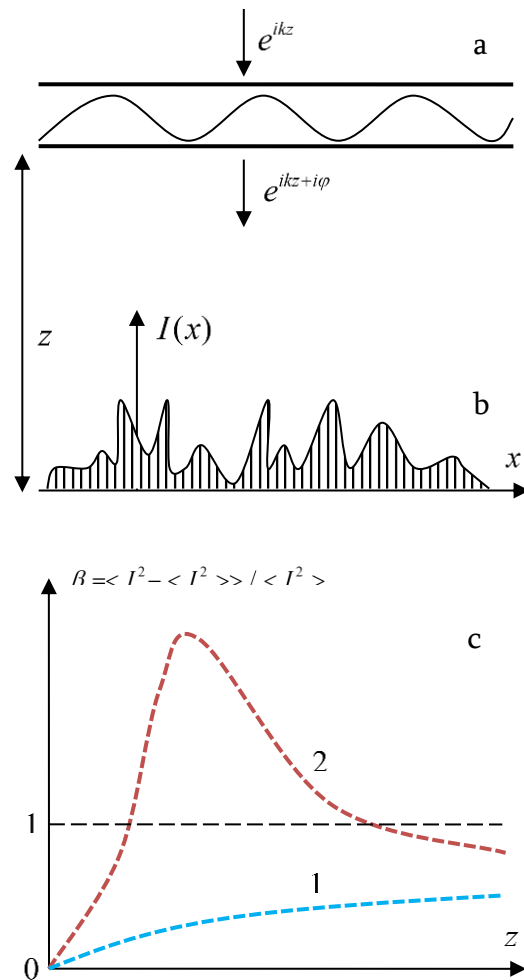
The present article deals with the methods of signal processing for the analyses of spectral characteristics of electromagnetic radiation. Analogical methods of signal processing are well known in the super high frequency range. Analogical methods were first applied in the visible spectrum range in the 1950s of the last century [8]. But since the invention of the laser sources of the light, the analogical methods have been widely applied in the spectroscopy. The numerical methods of signal processing take their origin from the experiment of photon counting, which was conducted for studying statistical properties of different laser sources [9]. On the basis of these methods we have worked out the highly effective numerical, rapid autocorrelator, which was working in the real-time mode and enabled us to make measurements in the broad frequency range 1 – 108 GHz. The purpose of the autocorrelator was to broaden the frequency range lower than 1 MHz. this problem has been resolved not long ago with Fabry–Perot’s interferometer [10]. Creation of the numerical generator for broadening the frequency range of the signal in the super high range is one of the profound tasks for us. We have developed the algorithm of the correlator construction, described the principle of correlator operation during changing the breadth of spectral lines. We have also discussed the cases of Gaussian and non-Gaussian signals as well as the experimental and theoretical outcomes about scattering systems when a signal has a non-Gaussian shape.

## 2. PROBLEM STATEMENT

From the above described four types of primary schemes, we will only discuss the fourth type of task. Our goal is to study the distribution of statistical moments of the

scattered laser radiation on the basis of the model of random phase screen.

Assume, that on  $z=0$  plain the primary  $E_0$  field statistics are given, i.e. its moments are given (coherence functions). We have to find out how are these functions changed via removing  $z=0$  plain, if the field is transformed on the way (for example, the wave moves through the diaphragm, lens, etc.).



**Figure 1.** a) model of phase screen, b) distribution of intensity after phase screen, c) qualitative image for scintillation index. 1– weak fluctuation  $\langle \psi^2 \rangle \ll 1$ , 2 – strong fluctuation  $\langle \psi^2 \rangle \gg 1$ .

Formally this problem can be solved quite easily: if we know how the determined wave is altered, (totally coherent) then it is enough to average by assemble the determined solvation of  $E_0$  field. But this way, as a rule, reduced to toughly calculated integrals. For instance, while calculating the fluctuations through the ratio of intensities,  $\beta = \langle I^2 - \langle I \rangle^2 \rangle / \langle I \rangle^2$  (same as a scintillation index), it is required to calculate the octal integral, which is practically impossible to be calculated

even in case of facilitated model. Facilitated limited model implies that the flat wave falls down on the layer  $e^{ikz}$ , directly on the reverse side of the screen  $E_0 = e^{ikz+i\psi}$ , where  $\psi(x, y)$  - is a random phase. Knowing the statistics of the screen phase causes the determination of the field statistics on  $z = 0$  plain. The “system” which transforms the field coming out of the screen, in this case, is simply free space. As a result of the diffraction the wave which moves through the chaotic phase screen is fluctuating (fig. 1, b). Though, the intensity on the phase screen is constant (fig. 1, a).

In this particular case, it is possible to calculate the scintillation index  $\beta$  for the phase screen during weak fluctuations of the phase  $\langle \psi^2 \rangle \ll 1$ . In case of strong fluctuations,  $\langle \psi^2 \rangle \geq 1$  - for calculating  $\beta$  at small  $z$  - distances we can use excitation method (we should take into account that the intensity fluctuations beyond the screen is small), and for  $z$  distances we can apply field normalization method. The normal law of distributing probabilities implies that during long  $z$  distances in the observation point multiple non-correlated wave creation takes place from different regions of the screen. We can find field asymptotics in the focused area while existing big phase fluctuations, i.e. when  $\langle \psi^2 \rangle \gg 1$ . As a result we get  $\beta(z)$  curves, the qualitative image of which is shown on fig.1 c.

### 3. STATISTICS OF SIGNALS

In order to describe the statistical process, let us represent the basic mathematical formalism which will be used for further discussions [15]. Say that any of the time dependent process is described with the variable  $s(t)$ . In spite of the fact that the functional dependence of  $s$  signal on time can be random, the measurement outcomes can be represented by the function  $W(s(t))$  of the density distribution of one dimensional probability, which determines the probability of the fact that the random volume receives  $s$  value in  $t$  time. Analogically, two dimensional distributions  $W(s(t_1), s(t_2))$  describe the probability of the fact that as a result of measuring, the amplitudes of the random variables in  $t_1$  and  $t_2$  moments receive  $s_1$  and  $s_2$  values. In multi-dimensional case the function of density distribution of the probabilities will be  $W(s(t_i))$  and it.

describes the comparatively complete statistics of the random  $s(t)$  function. The statistic moments contain equivalent information:

$$\langle s^n(t) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} s^n W(s) ds, \tag{3.1}$$

And correlative functions:

$$\left\langle \prod_i s^{n_i}(t_i) \right\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} W(s_i) \prod_i s_i^{n_i} ds_i. \tag{3.2}$$

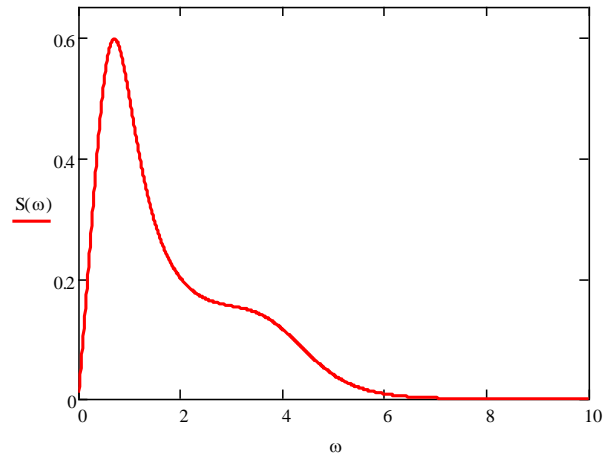


Figure 2. Distribution of Lorentz signal density

In case of stationary statistical process, the distribution of probabilities does not depend on time, i. e.:

$$\langle W(t)W(t+\tau) \rangle = \langle W(0)W(\tau) \rangle, \tag{3.4}$$

Onsager’s hypothesis, the fluctuation processes in water can be described with the macroscopic hydrodynamic rules. And fluctuation attenuation is described with time auto-correlative function, the Fourier-transform of which gives the analytical expression of the intensity of the optical spectrum, according to **Wiener-Khinchin** theorem. This theorem connects the density of signal capacity  $S(\omega)$  to its autocorrelation function  $G(\tau)$ .

$$S(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left\langle \left| \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2 \right\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} G(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

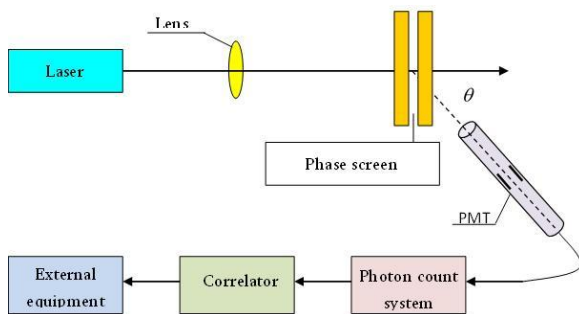
Thus, the signal capacity spectrum and its autocorrelation function are mutually related to each other with Fourier transform. For instance, if  $s(t)$  has a Lorenz form with a half width of the spectrum  $\Gamma$ , then the autocorrelation function of this signal represents a reducing exponent ( $\tau_c = \Gamma^{-1}$ ) given on the fig.2.

### 4. OPTICALLY SOLID RANDOM PHASE SCREEN

Let us discuss the electromagnetic wave propagation process on a random optically solid phase screen. Through this screen, during electromagnetic wave propagation, the random wave displacement will be produced which is a random function of coordinates. The majority of the works is dedicated to the problem of concreteness, for instance, scattering off the irregular

surface, though the general theoretical principles of the statistical and spectral characteristics of the scattered light are not completely processed for the light of non-Gaussian statistics. The signals with such statistics will be created in case when the scales characteristics to the refraction index are comparable with the size of lighting area.

Let us discuss the simple scheme of the experiment. During normal falling down the laser beam is focused on the phase screen. The phase screen is not thick and the directly scattered radiation is registered by means of photomultiplier. The axis of the photomultiplier makes a  $\theta$  angle towards the laser beam (fig. 3).



**Figure 3.** The scheme of the device in order to study the light scattered from the phase screen

The positive-frequency part of the electric field of the light wave, which moves through the phase screen, can be expressed as following:

$$\xi^+(\mathbf{r}, 0; t) = E_0 e^{i[\varphi(\mathbf{r}, t) - \omega_0 t]} \frac{r^2}{W_0^2} \quad (4.1)$$

where  $\varphi(\mathbf{r}, t)$  - is the random phase displacement caused by the screen dependent on the space coordinates. (4.1) expression is recorded in the cylindrical coordinate system, with the coordinates  $(r, \phi, z)$ . The phase screen is located in the  $z=0$  plain.  $W_0$  is the width of the Gaussian distribution of the stream intensity and it is characterized to the size of the illuminated area. According to the Helmholtz formula the field in  $V \equiv (r, \phi, z)$  point is determined by the following expression:

$$\xi^+(\mathbf{R}; t) = E_0 e^{-i\omega_0 t} \int_{-\infty}^{+\infty} d^2 \mathbf{r}' e^{ik|\mathbf{R}-\mathbf{r}'|} e^{i\varphi(\mathbf{r}', t)} e^{-\frac{r'^2}{W_0^2}} \quad (4.2)$$

where,  $k$  is a wave vector of light and the integration is carried out according to the illuminated area. Let's make the following expression:

$$|\mathbf{r}' - \mathbf{R}| = \sqrt{r^2 + z^2 + r'^2 - 2(\mathbf{r}'\mathbf{r})} \approx \sqrt{r^2 + z^2} \left( 1 - \frac{(\mathbf{r}'\mathbf{r})}{r^2 + z^2} \right)$$

The last expression is fair in the far zone when the distance to the source is longer than the linear size of the illuminated area, therefore:

$$\xi^+(\mathbf{R}; t) \cong E_0 e^{-i\omega_0 t} \int_{-\infty}^{+\infty} d^2 \mathbf{r}' e^{ik|\mathbf{R}-\mathbf{r}'|} e^{i\varphi(\mathbf{r}', t)} e^{-\frac{r'^2}{W_0^2}} \quad (4.3)$$

where  $\psi' - \mathbf{r}'$  - is a polar angle of the vector.

In order to calculate the statistical and spectral characteristics of such field, it is required to find out the properties of  $\varphi$  phase function. For facilitating the calculations, consider that  $\varphi$  has Gaussian statistics. During the light propagation, in randomly inhomogeneous media like an atmosphere, for instance, or liquid crystal, it is difficult to consider the statistics of  $\varphi$  as Gaussian, but the necessity of the further analysis requires considering the statistics of  $\varphi$  as Gaussian:

$$\langle \exp \left[ -i \sum_i \varphi_i \right] \rangle = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left\langle \left( \sum_i \varphi_i \right)^2 \right\rangle \right] \quad (4.4)$$

In the concrete case, consider that the space correlation structure of the phase function can be written as following:  $\rho(\mathbf{r}) = \langle \varphi(0, t) \varphi(\mathbf{r}, t) \rangle / \langle \varphi^2 \rangle$ . The average intensity of light in the distant zone can be found on the basis of (4.3) and (4.4) formulas:

$$\langle I(\theta; t) \rangle = \langle I \rangle = |E_0|^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} d^2 r' d^2 r'' \times e^{ik \sin \theta (r' \cos \psi' - r'' \cos \psi'')} e^{-\bar{\varphi}^2 (1 - \rho(r' - r''))} e^{-\frac{r'^2 - r''^2}{W_0^2}} \quad (4.5)$$

Similarly, we can calculate the second moment of the fluctuation distribution of the intensity:

$$\langle I^2 \rangle = W_0^2 |E_0|^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} d^2 r' d^2 r'' d^2 r''' e^{2ikr'' \sin \theta \cos \beta} e^{-\frac{r'^2 - r''^2 + r'''^2}{W_0^2}} \times e^{-\bar{\varphi}^2 (2 - \rho(r'' + r''') - \rho(r'' + r''') - \rho(r' - r''') + \rho(r' + r''') + \rho(r' - r'''))} \quad (4.6)$$

Where  $\beta$  represents the polar angle of  $\mathbf{r}''$  vector.

In general case, the (4.6) integral is a difficult solution, although, when  $\bar{\varphi}^2 \gg 1$ , the integral can be calculated through the saddle point approximation:

$$\exp[\bar{\varphi}^2 \rho(r)] \approx 1 + \exp[\bar{\varphi}^2 - 1] \exp[-\bar{\varphi}^2 r^2 / \lambda^2] \quad (4.7)$$

This approximation is fair in the area where  $f$  significantly depends on  $r$ . Considering (4.7) in (4.5) gives the following expression:

$$\langle I^2 \rangle = \pi^2 W_0^2 |E_0|^2 \left\{ W_0^2 e^{-\bar{\varphi}^2} e^{\frac{1}{2} k_0^2 W_0^2 \sin^2 \theta} + \frac{1 - e^{-\bar{\varphi}^2}}{W_0^2 + \frac{2\bar{\varphi}^2}{\lambda^2}} e^{-\frac{\frac{1}{2} k^2 \sin^2 \theta}{W_0^2 + \frac{2\bar{\varphi}^2}{\lambda^2}}} \right\} \quad (4.8)$$

The first member of the right side corresponds to the diffraction on the "aperture", i.e. in our case it corresponds to the diffraction during falling laser beam on the sample. The second member is completely controlled by the phase fluctuations. For great values of



$\bar{\varphi}^2$ , we can ignore  $\exp(-\bar{\varphi}^2)$  members, in this case, (4.8) gives the following expression:

$$\langle I \rangle = \frac{\pi^2 W_0^2 |E_0|^2}{2\bar{\varphi}^2} \exp\left[-\frac{k^2 \lambda^2 \sin^2 \theta}{4\bar{\varphi}^2}\right] \quad (4.9)$$

In the abovementioned approximation we can calculate (4.6) integral as well, which determines the second moment of the radiation. After a rather long refraction we obtain:

$$\frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} = 2 - \frac{2\lambda^2}{W_0^2} + \frac{\lambda^2 \bar{\varphi}^2}{4W_0^2} \exp\left[-\frac{k^2 \lambda^2 \sin^2 \theta}{4\bar{\varphi}^2}\right] \quad (4.10)$$

This expression aspires towards 2 when  $\lambda/W_0 \rightarrow 0$ , which is not characterized to Gaussian statistics. In case of the condition  $\lambda \ll W_0$ , for example, the second moment can be more than 2 if  $\bar{\varphi}^2$  is a great enough value. In addition, this effect can increase by increasing  $\theta$ . (4.9) average intensity is distinguished with controversial properties since in the expression of exponent „-“ sign appears.

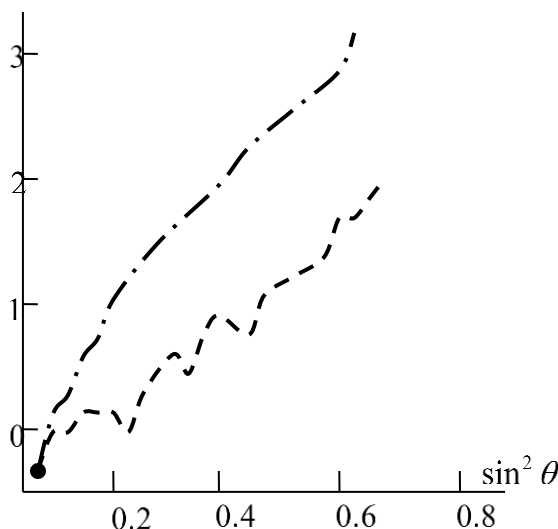
It is more difficult to calculate the higher quality moments through the above described methods. However, we can obtain more general results in the approximation discussed for “micro area” model. Assume, that the basic illuminated area is composed of  $V$  area of  $N$  amount.  $V$  micro areas in the distant wave zone gives statistically independent components. This model enables us to neglect  $\exp(-\bar{\varphi}^2)$  members. Therefore:

$$\xi^+(\theta; t) = \sum_{j=1}^N a_j(\theta, t) \exp(i\psi_j), \quad (4.11)$$

$$a_j^2(\theta, t) = |E_0|^2 \iint_V \iint_V e^{ik|\vec{r}-\vec{r}'| \sin \theta \cos \beta + \phi_j(\vec{r}; t) - \phi_j(\vec{r}'; t)} d^2 r d^2 r' \quad (4.12)$$

Where  $\beta$  is an angular variable, which corresponds to  $|\vec{P}-\vec{P}'|$  polar vector. (4.11) expression describes a random state of finite value on the complex  $\xi^+$  plain.

### 5. OUTCOMES OF NUMERICAL EXPERIMENT



**Figure 4.** Angular distribution of the first and second order moments of the intensity of the light scattered by liquid crystal phase screen of 25  $\mu\text{m}$ , when the electrohydrodynamic turbulence on the liquid crystal phase screen is created in conditions of 20 V. The area of the lighting area during an experiment was  $W_0 = 10.5 \mu\text{m}$ , the length of the liquid Crystal - 1 = 2,6  $\mu\text{m}$ ,  $\bar{\varphi}^2 \sim 36$ .

The dependencies of (4.9) and (4.10) intensities on  $W_0$  and  $\theta$  parameters were checked in an experimental way during studying light scattering from the thin (25  $\mu\text{m}$ ) liquid chrystral surface, on which electro-hydrodynamic turbulence was created (fig. 4). In our case, we considered that in certain conditions similar system acts like an optically solid phase screen. Though, the existence of the slight depolarization of the scattered light, besides the phase fluctuations, causes the creation of amplitude fluctuations. The existence of the amplitude fluctuations may cause slight deviation from the angular dependence of the intensity. These deviations are determined by (4.9) and (4.10) formulations. The dependence of the sample on the finite thickness is revealed during the dependence of the intensity on  $W_0$  parameter. For a big  $W_0$  parameter, this effect is small and can be ignored, though, when  $W_0$  and the sample thicknesses are the values of one and the same order, we may have a significant distortion of the wave front.

## 6. CONCLUSION

Thus, we have constructed the model of light scattering on the random phase screen, in which, it is considered that the scattered light phase is changed in a linear way in two dimensions. The model is fair in case of slightly illuminated area. The characteristic angle of the inclination of the scattered wave front is determined with the value  $(\overline{\varphi}^2)^{1/2}/k\lambda$ , which is close to the value of angular width of the average intensity distribution determined in the expression (4.6). This effect in fact, becomes measurable in an experimental way. It should be noted that in the liquid-crystal systems this effect can be observed without additional means of techniques even when the sample is illuminated with halogen light. As we can see, this circumstance depends on the fact that the difference of the ray course from different areas of the thin structure of the sample equals to at least several wave length, i.e. it belongs to the order of the white light coherency length.

Non-Gaussian member causes only the distortion of the form of the spectrum, but at the same time the correlation time is increased up to time order characterized to phase fluctuation. It is well known that the direct dimension of the phase spectrum is available in conditions of non-Gaussian statistics.

In the concluding part it should be noted that the study of statistical characteristics of the laser radiation scattered from the systems having non-Gaussian statistics has not started recently and naturally, we cannot have any claims that we will be able to create perfect, adequate theoretical model, even though, in case of optically solid phase screen for instance. But we can say that the outcomes of analytical and numerical experiment conducted by us will be valuable by all means in the point of view of analyzing statistical characteristics of the signals having non-Gaussian statistics.

## ACKNOWLEDGEMENT

Work it was spent within the limits of the scientific projects:

“Quantitative analysis of fluorescence characteristics of optically solid, random phase screen and spectral analysis of the statistical moments of the correlation function of the intensity of scattered laser radiation“ (FR/152/9-240/14 scientific supervisor Prof. Nugzar Gomidze), financed by SRNSF (Shota Rustaveli National Scientific Found, Georgia).

## REFERENCES

- [1] Forrester A.T., Gudmundsen R.A., Johnson P.O. *Phys. Rev.*, 99, 1691 (1955).
- [2] Lidar Methods of discovering oil pollution sources. (<http://ecoline.kiev.ua/articles/pider/lidmru.html>)
- [3] Gomidze N.Kh., Khajishvili M.R., Makharadze K.A., Jabnidze I.N., Surmanidze Z.J. About Statistical Moments of Scattered Laser Radiation from Random Phase Screen. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 6(4): 237-245, (2016).
- [4] Gomidze N.Kh., Khajishvili M.R., Makharadze K.A., Jabnidze I.N. “Some Features of Radio-Spectral Diagnostics of Random Media via PM and PRM Oscillations”, *Journal of Applied Mechanics and Materials*, 420: 305-310, (2013).
- [5] Vinogradova M.B., Rudenko O.V., Suxorukov A.P. Wave Theory. “Nauka”, (1989) (in Russian)
- [6] Ritov S.M., Kravtsov Y.A., Tatarsky V.I. Introduction in Statistical Physics. Vol.2 «Random Fields». «Nauka», (1978) (in Russian).
- [7] Akhmanov S.A., Diakov Y.E., Chirkin A.C. Introduction in Statistical Radiophysics and Optics. «Nauka», (1981) (in Russian).
- [8] Forester A.T., Gudmunsen R.A., Johnson P.O., *Phys. Rev.*, 99: 1961, (1955).
- [9] Pike E.R., Jakeman E. Photon statistics and photon correlation spectroscopy. Adv. Quantum Electron, Academic Press, (1973).
- [10] Pike E.R. *Nuovo-Cunento*, 1, 277, (1969).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

## Wave energy potential assessment for Riva and Foça, Turkey

*Riva ve Foça, Türkiye için dalga enerji potansiyeli değerlendirmesi*

*Yazar(lar) (Author(s)): Egemen SULUKAN*

*ORCID: 0000-0003-1138-2465*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Sulukan E., “Wave energy potential assessment for Riva and Foça, Turkey”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 129-135, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.385825

# Wave Energy Potential Assessment for Riva and Foça, Turkey

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Egemen SULUKAN\***

National Defense University, Turkish Naval Academy, Mechanical Engineering Department, İstanbul, Turkey

(Geliş/Received : 17.01.2017 ; Kabul/Accepted : 16.05.2017)

## ABSTRACT

Humankind has been looking for alternative energy supply options. This search has always been a big challenge. Renewable energy sources blossom the most possibly nature-harmonized options with no harmful propagation or emissions. Turkey, as a developing country and a highly experienced candidate to European Union membership, determines relevant energy policies by assessing domestic energy potentials. However, no official target for energy utilization from the seas is officially set so far. Wave energy can be one of the alternatives that can contribute to the energy mix of Turkey. This contribution would also positively affect the fossil fuel import rates of the country while the wave energy conversion technologies mature and penetrate the energy markets. With this in mind, wave energy potentials have been calculated for two locations, Riva and Foça; based on the data measured and obtained from the Office of Navigation, Hydrography and Oceanography of Turkish Navy. Comparatively low wave energy level results are obtained, mainly caused by the measurement sites are not on the shores of open sea or oceans, but inner seas. These results would hopefully help the respective engineers to reach the most suitable designs for these wave characteristics.

**Keywords:** Wave energy, wave energy potential, significant wave height, wave period.

# Riva ve Foça, Türkiye için Dalga Enerji Potansiyeli Değerlendirmesi

## ÖZ

İnsanoğlu alternatif enerji arz seçenekleri arayagelmektedir. Bu arayış her zaman büyük bir mücadele olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynakları, doğaya en uyumlu olası seçenekleri, zararlı bir yayılım veya emisyon olmadan sunar. Türkiye, gelişmekte olan bir ülke ve Avrupa Birliği üyeliğine oldukça deneyimli bir aday olarak, yerli enerji potansiyellerini değerlendirerek ilgili enerji politikaları belirlemektedir. Bununla birlikte, bugüne kadar denizlerden enerji kullanımı için resmi bir hedef belirlenmemiştir. Dalga enerjisi Türkiye'nin enerji karışımına katkıda bulunabilecek alternatiflerden biri olabilir. Dalga enerji çevrim teknolojileri olgunlaşarak enerji piyasalarına nüfuz ederken, bu katkı ülkenin fosil yakıt ithalat oranlarını da olumlu yönde etkiler. Bu düşünceyle, Türk Deniz Kuvvetleri Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesinden alınan ve elde edilen verilere dayanılarak, Riva ve Foça olmak üzere iki konum için dalga enerjisi potansiyeli hesaplanmıştır. Ölçüm sahalılarının açık deniz veya okyanus kıyılarında değil, iç sahillerde olması sebebiyle nispeten düşük dalga enerji seviyesi sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçların bu alanda çalışacak mühendislerin bu dalga karakteristikleri için en uygun tasarımlara ulaşmalarına yardımcı olması umulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Dalga enerjisi, dalga enerjisi potansiyeli, belirgin dalga yüksekliği, dalga periyodu.

## 1. INTRODUCTION

Turkey, as a country highly dependent on energy imports, has been seeking alternative energy resource options in order to alleviate the budgetary burden mainly arising from its energy imports. As a developing country, Turkey is still suffering from high energy imports. Meanwhile, it is aimed to increase the installed renewable energy systems and reach 600 MW installed capacity in solar power plants, 600 MW in geothermal power plants, 20000 MW in wind power plants and 36000 MW of hydroelectric potential until the year 2023 to be transformed into a more domestic resource-supplied country profile.

This official vision clearly appeared in the "Electricity Energy Market and Supply Security Strategy Paper" published under coordination of Under-secretariat of State Planning Organization of Turkey in 2009; which has been the backbone and foundation of the policy and strategies shortly expressed as "Our primary target is to ensure that the share of renewable resources in electricity generation is increased up to at least 30% by 2023. This target will be subject to revision based on potential developments in the technology market, and resource potential" by the Ministry of Natural Resources and Energy of Turkey [1].

Even though it is aimed to maximize the renewable energy utilization by the year 2023, 100th anniversary of the founding of the Republic of Turkey, no targets are set for wave energy utilization in this strategy paper. However, this issue could be assessed under the title

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : esulukan@dho.edu.tr, egemensulukan@gmail.com

“other renewables” of this strategy paper, depending on the maturing technologies and its proven technical and economic potential in time. Wave energy is evaluated by previously conducted studies as a yearly potential of 18.5 TWh [2] and 10 TWh [3] as one of the alternative energy resources of the country. Wave energy can obviously contribute to the energy mix with its potential, as well as resource security and diversification dimensions of this issue.

The energy policies of Turkey have been evaluated by various studies so far. An outlook is given by Yılmaz and Uslu for the period 1923-2003, investigating the implemented policies in the energy field during different periods since the foundation of the Republic of Turkey in 1923 [4]. Kiliç and Kaya gave a general outlook about the energy reserves, energy demand, energy production, energy consumption, energy policies, and relevant developments in their study [5]. From the renewable energy potentials perspective, Benli conducted a study on the potential of renewable energy resources in Turkey and the magnitude of their current and future contributions to the national energy consumption considering energy politics [6]. Ozgur also investigated the present state of world renewable energy sources and then looked in detail at the potential resources available in Turkey [7].

Some other analyses reported the energy production and policy status in Turkey [8-10]. Kabak and Dağdeviren analyzed and prioritized the renewable energy sources for Turkey by using a hybrid multi-criteria decision-making methodology [11]. Nevertheless, as one of the primary studies conducted in Turkey in wave energy context, Taşdemir has analyzed the wave power potential along the coast of Turkey in 1991 [12]. Özdamar, et al investigated the wind-wave potential of Çeşme-Turkey [13]. In another comprehensive study, Ayat published the wave power atlas of Eastern Mediterranean and Aegean Seas [14], and Aydoğan et al produced the wave energy atlas of the Black Sea from 13-years hindcasted wave data [15]. Akpınar et al assessed wave energy resource of the Black Sea based on 15-year numerical hindcast data [16]. Citiroglu and Okur studied on wave energy converter (WEC) applications in Ereğli on the western Black Sea coast of Turkey [17].

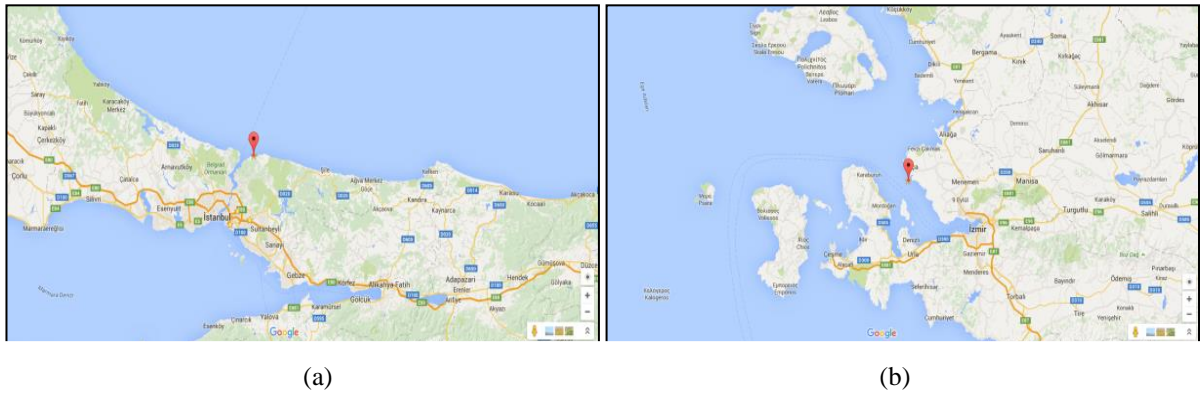
Even though the wave energy potential of Turkish coasts has been evaluated many times, no commercial wave energy conversion system implemented so far. Nevertheless, a recent application to the Energy Market Regulatory Authority (EMRA) for energy production license has been accepted as a breakthrough in this area. This project, namely “Gelemiş Wave Power Plant” reportedly will be located in Kaş, Antalya with an installed capacity of 4.5 MW.

The wave energy area has also attracted a global attention. A number of studies have been conducted for wave energy potential estimations, in Lebanon [18], Lithuanian coast of the Baltic Sea [19], Azore Islands [20], and Sicily (Italy) [21].

Apart from the potential estimations, the energy harvesting technologies have also been an interesting field to be reviewed and improved. Wave energy technologies and the necessary power-equipment are analyzed by López et al [22], Rusu and Onea assessed the performances of various WECs along the European continental coasts [23] and recently, Di Fresco and Traverso analyzed the simulation and test of the Seaspoon WEC [24].

Besides the developments in technology and implementations, allocation of the wave energy converters have recently risen an important issue. Three wave energy converter arrays located in the Turkish coasts of the Black Sea are analyzed by modeling four sea states observed at each of two locations to investigate the effects of the wave-body interactions on the energy generation within arrays [25], while a test bed study conducted to evaluate best practices in wave modeling to characterize energy resources of Oregon Coast, with its high wave energy and available measured data and two third-generation spectral wave models, SWAN and WWIII, were evaluated to employ a four-level nested-grid approach [26].

Additionally, different studies conducted to determine the optimal size of a cylindrical buoy based on wave characteristics: wave length, amplitude, velocity and other factors. Waves are classified into long-period swell waves and short-period lippers and a bouy design with a skirt is proposed to increase the cylindrical buoy's damping and to decrease the effect of the ripple energy source, which can easily cause instability of the energy system [27]. Zou, et al applied the optimal control theory to compute control for a single-degree-of-freedom heave wave energy converter. In order to maximize the energy extraction per cycle for both constrained and unconstrained optimal control problems considering the periodic and non-periodic excitation forces. Their simulation results show that the proposed optimal control solution matches the solution obtained using the complex conjugate control with the advantage of the proposed control without the need for wave prediction; but only requiring the knowledge of the excitation force and its derivatives at the current time [28]. Bozzi et al focused on hydrodynamic interactions between heaving wave energy converters in wave parks of four devices, simulated in the time domain by a hydrodynamic-electromagnetic model, coupled with a boundary element code for the estimation of hydrodynamic parameters, considering to assess the effect of design parameters on array power production. Then, a site-specific design optimization is carried out for different Italian locations and some key insights on wave farm design in real wave climates are provided show that the effect of wave interactions on energy absorption is not expected to be a main issue, as long as the devices are separated by at least 10 buoy diameters and that the layouts are oriented to achieve the maximum energy absorption for the prevailing wave direction [29].



(a) (b)  
**Figure 1.** Wave buoy locations in Riva (a) and Foça (b)

The wave climate around Turkey and wave prediction studies have been made in previously conducted NATO TU-Waves Project. At the end of this project, a wind and wave atlas with detailed statistical information, including wind and wave climate for the Black Sea and the other Turkish coasts is published [30].

Sağlam et al studied on “Calculating the Technical Potential of Wave Energy in Turkey, Case Studies for Project Feasibility and Design”. Wave power assessment was given for most of the sites in Turkish waters [3].

Ferreira and Soarez studied on modelling distributions of significant wave height [31] and Özger et al studied on the general wave energy formula by using perturbation theory and the impact of the standard deviations of the two wave variables in determining the amount of available wave power in a sea site [32].

This paper is structured as follows: Chapter 1 gives a brief review of wave energy studies, Chapter 2 introduces the materials and methodology, including the area of interest of this paper and wave data used in the calculations and information about the wave buoys used for measurements and then gives the theoretical background heading the wave power potential assessment in two selected locations. The calculation results are represented in Chapter 3, with the conclusions given in Chapter 4 and; finally, discussions take place in Chapter 5.

## 2. MATERIALS AND METHODOLOGY

Even number of studies have been conducted to evaluate the wave energy potential near the shores of Turkey, these above mentioned studies are mostly based on formulae or computer data calculated on a grid system. This gap is a result of the lack of wave measurements along the shores of Turkey. Therefore, the estimations calculated in this paper aims to provide a regional insight near these two locations in the Black Sea and Aegean Sea for future wave energy studies.

In this study, wave data measured by the Office of Navigation, Hydrography and Oceanography (ONHO) of the Turkish Navy are used to calculate more precise wave energy potentials for different two locations. Two

important parameters, the significant wave height ( $H_s$ ) and the zero up-crossing-period ( $T_e$ ) values are measured, recorded and processes by ONHO in two different locations around the Anatolian peninsula.

The first buoy is located at Riva site at coordinates  $41^{\circ}13'42.1''N-29^{\circ}11'24.1''E$ , just near to northern entrance to Istanbul Straits from the Black Sea, on 18,5 meters depth, as illustrated in Figure 1. The second buoy is located at coordinates  $38^{\circ}36'59.7''N 26^{\circ}44'24.2''E$ , near Foça at the mid-region of the Aegean Sea, on a depth of 41 meters.

### 2.1. Wave Buoys



**Figure 2.** Waverider DWR-Mk III buoy (Courtesy of Datawell BV)

Datawell Waverider MK-III, as shown in Figure 2, measures wave height per second with a stabilized platform sensor, enabling wave height measurements by a single accelerometer. The wave direction, direct pitch and roll measurements are performed with horizontal accelerometers and a compass, by the sensor unit. The collected data are sent to a computer, linked to the buoy, and then statistical and spectral analyses are held in every 30 minutes, periodically [33].

### 2.2. Wave Energy Potential Assessment

The movement of water creates the wave power in the marine environment. Wave energy project developers need to find the average resource as the first step. The

power E (in kW/m) in a wave is approximately equal to the square of the significant wave height  $H_s$  multiplied by the zero up-crossing wave period  $T_e$  as follows:

$$E = \frac{\rho g^2 T_e H_s}{64\pi} \quad (1)$$

where  $\rho$  is the density of the sea water, and  $g$  is the gravitational acceleration. The typical sea state is composed of many individual components, each of which is like the ideal monochromatic wave, with the properties such as period, wave height and direction. The total power, carried by each unit length of the wave is equal to the sum of the powers of each these component. It is a reality that, measuring all the heights and periods is impossible, therefore an averaging process is used to evaluate the total power.

With respective data, both significant wave height ( $H_s$ ) and the zero up-crossing-period ( $T_e$ ) measured at Riva and Foça, the power has been estimated using the general expression of wave power (kW/m) for deep-water, (1), in spite of accuracy loss and ignoring detailed directional information.

$$E = \alpha \times T_e \times H_s^2 \quad (2)$$

where, significant wave height,  $H_s$ , is the average of the highest one-third of the waves and the zero up-crossing period,  $T_e$ , number of how many times the seawater surface crosses upward the mean level in a defined time interval.

Later, the same wave energy potential assessment in these sites executed using the stochastic structure of wave power potential formulation additional to traditional calculations. The general wave power formulation (2) derived by using the perturbation theory that gives the average power at those two points [32].

The annual variation in sea states can be expressed by a “sea-state scatter diagram” (e.g. Table 1), which indicates how often a sea state with a particular combination of  $H_s$  and  $T_e$  occurs annually.

### 3. RESULTS

Considering that all the heights and periods are dependent for an irregular sea, statistical analysis showed the wave power density at Riva site  $P_{ave}$  is 4.8 kW/m with regard to the range of wave heights up to 3.9 m and wave period up to 11 seconds were available at most of the year. The sea state scatter diagram of the site, Riva (the Black Sea) has been prepared using the significant wave height, mean and peak wave periods as shown in Table 1, containing the significant height ( $H_s$ ), wave period and weighting values corresponding to  $H_s$  and  $T_e$ . Weighting values describe how many times it occurs in the time period of measurement. Power at Foça Site is calculated comparably as 2 kW/m less than the power calculated for Riva site.

The methodology used in the perturbation method, equation (2) is implemented for the measured data taken from ONHO. Actual wave power potential assessment in both sites was more than the power calculated using the traditional formula as 7.87 kW/m for Riva site and 3.1 kW/m for Foça site. The error ratio of power estimations between average and actual powers for Riva site is 38.9% and 36% for Foça site.

When the assessment is compared to the previous calculated results, Figure 3 (a) and (b) shows that the results occur between the minimum and maximum power levels [3]. The results arrived by using data.

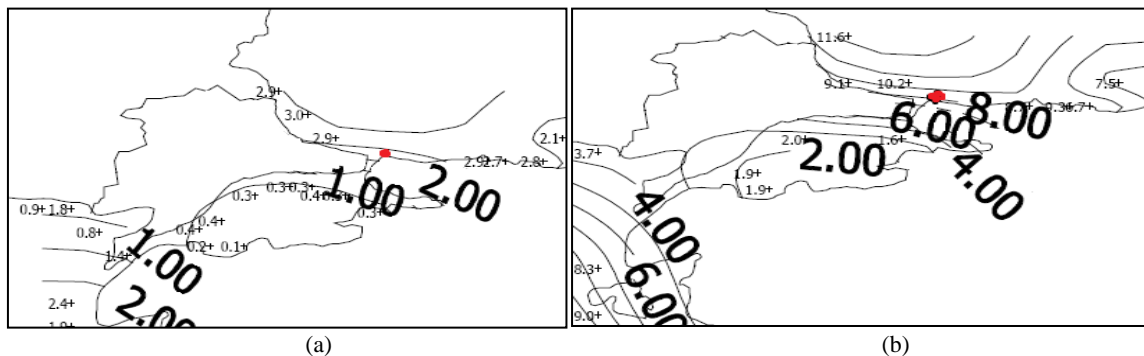


Figure 3. (a) Minimum and (b) maximum wave power levels at Riva site (kW/m)

$$\bar{E} = 0.49 \bar{H}_s^2 \bar{T}_e \left( 1 + \frac{\sigma_H \sigma_H}{\bar{H}_s^2} + 2 \frac{\tau_{HT} \sigma_H \sigma_T}{\bar{H}_s \bar{T}_e} + \frac{\tau_{H^2 T} \sigma_H^2 \sigma_T}{\bar{H}_s^2 \bar{T}_e} \right) \quad (3)$$

Where,  $\bar{H}_s$  and  $\bar{T}_e$  are the arithmetic averages and  $\sigma_H$ ,  $\sigma_T$  and  $\sigma_{H^2}$  are the standard deviations of significant wave height, zero up-crossing period and significant wave height squared, respectively.

measured by ONHO and calculated in NATO TU-Waves project coincide with each other in a great scale.

Figure 4 shows that, the highest wave power occurs mainly in winter and autumn seasons. Especially, the period between January and April gives a power level of 13.8 kW/m; then declining to the least levels of 0.7 to 1.1 kW/m between April to July. After July, it rises to 4.3 kW/m level in August. The power level reaches the highest point to 25.6 kW/m between September-December 2012. Figure 4 may give a general idea about

the specification basics of wave energy converter design, which to be built according to sea-wave climate while the dominant wave power level results in 4.3 kW/m at Riva site. Calculations made by these

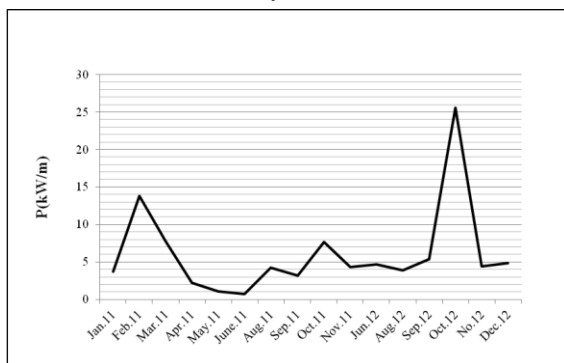


Figure 4. Monthly variation of wave power at Riva site

measured wave characteristics varying 4.8-7.8 kW/m of power in the Riva site. This result indicates a correlation with the results obtained from the previously conducted studies. The calculated maximum wave energy level is around the previously calculated value (8 kW/m) as given in Figure 3. However, the minimum energy level is around 4.8 kW/m, which is higher than the previous result found around 2 kW/m.

Recent calculation based on measured wave characteristics results 2.0-3.1 kW/m in Foça site. Figure 5 gives the minimum and maximum wave power levels belonging to Foça site, varying 2.26 - 8.40 kW/m.

Wave power levels are illustrated in Figure 5 with the

#### 4. CONCLUSION

This study brings a calculation by using the measured data belonging to two different locations obtained from an official state institution rendered to reach the virtual amount of power intervals.

At the first look, the wave energy potential of Turkey can be assessed as uneconomical for electricity generation under current circumstances and by means of current WEC technologies. However, it is a reality that there is such a potential in the country, which is surrounded seas by the three sides. This potential may currently be ignored as wave energy-based electricity generation targets still does not appear in the official strategy paper. Turkey, as an import-dependent on energy country by 73%, importing almost all oil and natural gas and one fifth of all coal, should make every effort to minimize energy imports by taking all kinds of energy potentials into account.

Even the current evaluations on wave-energy based electricity production may not seem to contribute to higher levels when compared to conventional sources, this level will increase due to the technological developments in time.

As another important issue about the utilization of the current WEC technologies on the seas surrounding Turkey, it is widely known that the larger sized WECs require higher investment costs and bring potential structural problems associated with strength, and corrosive effects on material. For these two sites, it is assessed that, this “mild” sea-wave regime may divert the designer to combine an array of smaller sized WECs to

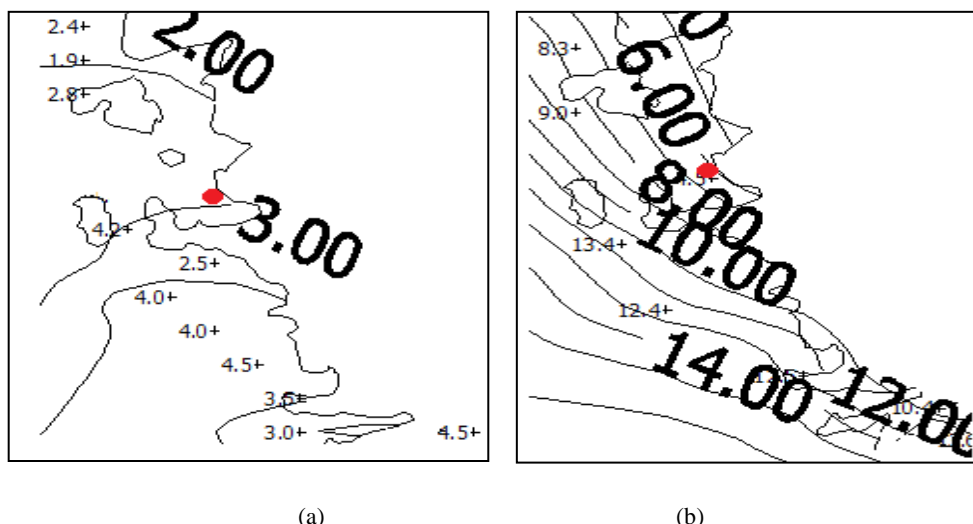


Figure 5. (a) Minimum and (b) maximum wave power levels at Foça site (kW/m)

contours at this site. Figure 5(a) shows the minimum wave power levels calculated around 4.2 kW/m for the measurement site, while the maximum level is around 4.5 kW/m. The buoy is located in a position in a very short distance to the shoreline. As the energy level decreases around the shoreline, it is increasing when getting distant from the shore. This region gives a promising situation in terms of mild sea state and wave energy potential.

be moored near these locations and harness the wave energy avoiding structural damages with other potential risks associated with large WEC sizes. At the end, implementing the arrays of these WECs would give optimal and determined electricity generation with cost-effective project budgets.

Current energy technologies will remarkably mold the energy mixture of future. It is widely accepted that fossil



fuels are widely consumed in transportation, industrial, residential sectors and conversion technologies and appear as the main cause of the environmental contamination. Unless cleaner alternative energy carriers replace the fossil fuels, greenhouse gases will continue to be responsible mainly for the global warming.

Demand technologies used in transportation sector use liquid fuels and electricity mostly. Aviation vehicles use liquid fuels only. In the near future, hydrogen may be one of the convenient fuels as well as it is in the other sectors. One seventh of the world surface is covered by water. Exploiting vast offshore opportunities, wave energy farms for electricity and hydrogen production can be a good mean for the storage systems.

Nevertheless, efforts to generate electricity from wave power can be associated with hydrogen production at the respective electricity production site. Current studies indicate an abundant hydrogen-sulphide potential in the Black Sea. It seems possible to separate these two valuable substances, hydrogen and sulfur using electricity, which is produced by WECs nearby. Thus, it is to cause to decrease the contamination of the Black Sea [35].

## 5. DISCUSSION

The potential life of fossil sources should be elongated by adding every unit of renewable energy to the energy mix since next generations may be in need of them, which are stored in deeper layers of the earth. Wave energy, as the most intense alternative among other solar originated energy resource options, wave energy can be harnessed even from the mild seas by means of appropriately designed WEC farms. Turkey can get the utmost benefit of seas surrounding her three sides, and admire the value of the smallest rocky island in surrounding seas, which will most probably be a natural base for offshore wind and wave energy installations.

## ACKNOWLEDGEMENT

The Author would like to thank the Office of Navigation, Hydrography and Oceanography of the Turkish Navy for their unlimited and precious efforts on marine environment, especially for the wave data obtained, and Engineering Faculty of Marmara University for their support of this research.

## REFERENCES

- [1] State Planning Organization of Turkey, “*Electricity Energy Market and Supply Security Strategy Paper*”, DPT, Ankara, Turkey, (2009).
- [2] Hepbasli A., Ozdamar A., Ozalp N., “Present status and potential of renewable energy sources in Turkey”, *Energy Sources*, 23: 631-48, (2001)
- [3] Saglam M., Sulukan E., Uyar T.S., “Wave energy and technical potential of Turkey”, *Journal of Naval Science and Engineering*, 6(2): 34-50, (2010)
- [4] Yılmaz O., Uslu, T., “Energy policies of Turkey during the period 1923-2003”, *Energy Policy*, 35: 258-264, (2007)
- [5] Kiliç F.Ç., Kaya D., “Energy production, consumption, policies, and recent developments in Turkey”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11: 1312-1320, (2007)
- [6] Benli H., “Potential of renewable energy in electrical energy production and sustainable energy development of Turkey: Performance and policies”, *Renewable Energy*, 50: 33-46, (2013)
- [7] Ozgur M.A., “Review of Turkey's renewable energy potential”, *Renewable Energy*, 33: 2345-2356, (2008)
- [8] Yüksel I., “Energy production and sustainable energy policies in Turkey”, *Renewable Energy*, 35: 1469-1476, (2010)
- [9] Tükenmez M., Demireli E., “Renewable energy policy in Turkey with the new legal regulations”, *Renewable Energy*, 39: 1-9, (2012)
- [10] Basaran S.T., Dogru A.O., Balcik F.B., Ulugtekin N.N., Goksel Ç., Sozen S., “Assessment of renewable energy potential and policy in Turkey-toward the acquisition period in European Union”, *Environmental Science and Policy*, 46: 82-94, (2015)
- [11] Kabak M., Dağdeviren M., “Prioritization of renewable energy sources for Turkey by using a hybrid MCDM methodology”, *Energy Conversion and Management*, 79: 25-33, (2014)
- [12] Taşdemiroğlu E., “Wave-power potential along the coast of Turkey”, *Energy*, 16: 779-782, (1991)
- [13] Ozdamar A., Gursel K.T., Orer G., Pekbey Y., “Investigation of the potential of wind-waves as a renewable energy resource: by the example of Cesme-Turkey”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(6): 1364-0321, (2004)
- [14] Ayat B., “Wave power atlas of Eastern Mediterranean and Aegean Seas”, *Energy*, 54: 251-262, (2013)
- [15] Aydoğan B., Ayat B., Yüksel Y., “Black Sea wave energy atlas from 13 years hindcasted wave data”, *Renewable Energy*, 57: 436-447, (2013).
- [16] Akpınar A., Kömürcü M.İ., “Assessment of wave energy resource of the Black Sea based on 15-year numerical hindcast data”, *Applied Energy*, 101: 502-512, (2013)
- [17] Citiroglu H.K., Okur A., “An approach to wave energy converter applications in Ereğli on the western Black Sea coast of Turkey”, *Applied Energy*, 135: 738-747, (2014)
- [18] Aoun N.S., Harajli H.A., Queffeuilou P., “Preliminary appraisal of wave power prospects in Lebanon”, *Renewable Energy*, 53: 165-173, (2013)
- [19] Kasiulis E., Punys P., Kofoed J.P., “Assessment of theoretical near-shore wave power potential along the Lithuanian coast of the Baltic Sea”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41: 134-142, (2015)
- [20] Rusu L., Soares C.G., “Wave energy assessments in the Azores islands”, *Renewable Energy*, 45: 183-196, (2012)
- [21] Monteforte M., Re C.L., Ferreri G.B., “Wave energy assessment in Sicily (Italy)”, *Renewable Energy*, 78: 276-287, (2015)
- [22] López I., Andreu J., Ceballos S., Alegría I.M., Kortabarria I., “Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27: 413-434, (2013)

[23] Rusu L., Onea F., “Assessment of the performances of various wave energy converters along the European continental coasts”, *Energy*, 82: 889-904, (2015)

[24] Fresco L.D., Traverso A., “Energy conversion of orbital motions in gravitational waves: Simulation and test of the Seaspoon wave energy converter”, *Energy Conversion and Management*, 86: 1164-1172, (2014)

[25] Erselcan İ.Ö., Kükner A., “A numerical analysis of several wave energy converter arrays deployed in the Black Sea”, *Ocean Engineering*, 131: 68-79, (2017)

[26] Yang Z., Neary V.S., Wang T., Gunawan B., Dallman A.R., Wu W.C., “A wave model test bed study for wave energy resource characterization”, *Renewable Energy*, (Available online 23 December 2016)

[27] Wang Y.L., “Design of a cylindrical buoy for a wave energy converter”, *Ocean Engineering*, 108: 350-355, (2015)

[28] Zou S., Abdelkhalik O., Robinett R., Bacelli G., Wilson D., “Optimal control of wave energy converters”, *Renewable Energy*, 103: 217-225 (2017)

[29] Bozzi S., Giassi M., Miquel A.M., Antonini A., Bizzozero F., Gruosso G., Archetti R., Passoni G., “Wave energy farm design in real wave climates: the Italian offshore”, *Energy*, 122: 378-389, (2017)

[30] Özhan E., Abdalla S., “*Türkiye Kıyıları Rüzgar ve Derin Deniz Dalga Atlası*”, Middle East Technical University (MEDCOAST), Ankara, (2002).

[31] Ferreira J.A., Soares C.G., “Modelling distributions of significant wave height”, *Coastal Engineering*, 4: 361-374, (2000)

[32] Özger M., Altunkaynak A., Şen Z., “Statistical investigation of expected wave energy and its reliability”, *Energy Conversion and Management*, 45: 2173-2185, (2004)

[33] Datawell BV., “*Oceanographic Instruments Reference Manual*”, Datawell, Haarlem, (2015)

[34] Tucker M.J., Pitt E.G., “*Waves in ocean engineering*”, Elsevier Science, Oxford, (2001)

[35] Baykara S.Z., Figen E.H., Kale A., Veziroglu T.N., “Hydrogen from hydrogen sulphide in Black Sea”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 1246-1260, (2007)

**Table 1.** Sea state scatter diagram for Riva

		Wave period, (Ts), (sec)																																																					
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39															
Significant wave height, (Hs), (m)	1.75	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0												
	2.00	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
	2.25	4	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
	2.50	0	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
	2.75	1	11	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	3.00	2	11	4	7	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	3.25	1	7	4	7	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	3.50	5	17	12	9	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	3.75	2	8	6	2	1	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	4.00	3	12	10	13	5	4	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	4.25	1	6	5	8	2	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4.50	5	29	21	16	8	11	4	6	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	4.75	2	9	16	7	4	8	7	4	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	5.00	1	9	16	6	17	6	4	7	3	2	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	5.25	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	5.50	2	9	9	5	7	4	8	7	1	5	3	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	5.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6.00	1	11	3	5	6	11	11	6	10	7	5	2	0	3	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	6.25	1	5	9	4	6	11	6	7	9	7	2	4	8	9	5	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6.75	2	5	4	3	3	7	4	7	10	9	7	6	2	5	4	0	1	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	7.00	2	6	2	0	2	2	3	3	6	4	9	5	5	6	3	7	2	4	4	1	2	3	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7.75	1	0	0	1	0	0	4	5	4	1	6	5	2	4	4	5	5	2	4	3	3	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8.25	0	2	1	0	0	0	1	1	0	1	2	1	1	5	3	2	5	2	1	0	2	0	1	1	0	1	2	1	2	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9.00	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	3	2	0	0	0	0	0	2	1	1	0	1	0	2	1	0	1	0	2	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	9.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	1	1	1	0	1																					



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

## Köprü ayağı etrafındaki türbülanslı akımın sayısal ve deneysel analizi

### *Numerical and experimental analysis of turbulence flow around bridge pier*

Yazar(lar) (Author(s)): N. Göksu SOYDAN<sup>1</sup>, Oğuz ŞİMŞEK<sup>2</sup>, M. Sami AKÖZ<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-6469-2649

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-6324-0229

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-0282-0574

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Soydan N. G., Şimşek O. ve Aköz M. S., “ Köprü ayağı etrafındaki türbülanslı akımın sayısal ve deneysel analizi”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 137-147, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.389584

# Köprü Ayağı Etrafındaki Türbülanslı Akımın Sayısal ve Deneysel Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

N. Göksu SOYDAN<sup>1</sup>, Oğuz ŞİMŞEK<sup>2\*</sup>, M. Sami AKÖZ<sup>2</sup>

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

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

(Geliş/Received : 18.01.2017 ; Kabul/Accepted : 16.05.2017)

## ÖZ

Dairesel bir köprü ayağı etrafındaki türbülanslı akış alanı, çoklu girdapların oluşumu nedeniyle karmaşık bir yapıya sahiptir. Köprü ayağı etrafında meydana gelen bu karmaşık akım yapısının belirlenmesi, bu tür yapıların tasarımı açısından önem kazanmaktadır. Bu çalışmada köprü ayağı etrafındaki üç boyutlu türbülanslı akımın hız alanı laboratuvar ortamında Lazer Doppler Anemometresi (LDA) ile ölçülmüş ve deney ile aynı koşullardaki akım için temel denklemler, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent paket programı ile sayısal olarak çözülmüştür. Sayısal modellemede, Standard  $k-\epsilon$ , Renormalization Group  $k-\epsilon$  ve Realizable  $k-\epsilon$  türbülans modeli kullanılmış ve serbest su yüzü profili Akışkan Hacimleri Yöntemi ile hesaplanmıştır. Seçilen ağ yapısının sayısal sonuçlara olan etkisini incelemek için Ağ Yakınsama İndeksi (GCI) kullanılmıştır. Sayısal sonuçlardan elde edilen hız alanı ve su yüzü profilleri deneysel ölçümlerle karşılaştırılmış, Realizable  $k-\epsilon$  türbülans modelinin köprü ayağı etrafındaki akım alanını belirlemede diğer modellere göre daha başarılı olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Köprü ayağı, LDA, RANS, türbülans modellemesi, VOF.

## Experimental and Numerical Analysis of Flow around a Circular Bridge Pier

### ABSTRACT

The turbulent flow field around a circular pier is complex due to separation and generation of multiple vortices in different structures. This topic has a great interest in engineering applications for the design of the bridges over water. In this study, the velocity field of flow around a circular pier is measured using Laser Doppler Anemometry (LDA). The Basic equations of the problem are solved by ANSYS-Fluent program package based on finite volume method for the flow case having the same experimental conditions. In the numerical simulations, Standard  $k-\epsilon$ , Renormalization Group  $k-\epsilon$  and Realizable  $k-\epsilon$  turbulence closure model are used for the simulation of turbulence, and the flow profile is computed using Volume of Fluid method. Grid Convergence Index (GCI) is performed to examine the effect of the selected grid structure on the numerical results. The computed results for velocities and free surface profiles are compared with measured data. The comparisons of the experimental and numerical results show that Realizable  $k-\epsilon$  is more successful turbulence model among the other models in predicting the velocity field and free surface profiles.

**Keywords:** Bridge pier, LDA, RANS, turbulence modeling, VOF

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geçmişte yaşanan köprü yıkılması olayları incelendiğinde, köprü ayağında oluşan hasarların genellikle hidrolik faktörlerden kaynaklandığı görülmektedir. Nehir yatağında meydana gelen oyulma, nehirler üzerine inşa edilmiş köprülerin güvenliğini olumsuz yönde etkileyen en önemli hidrolik faktörlerden biridir. Oyulma, hidrodinamik kuvvetlerin etkisiyle oluşan bir yatak erozyonudur. Akış hızında meydana gelen yükselme, oyulma yoğunluğunda artışa sebep olmaktadır [1]. Köprü ayakları etrafındaki toplam oyulma, genel taban oyulması, köprü ayakları arasındaki daralma oyulması ve orta-kenar ayaklarının çevresinde meydana gelen oyulma derinliğinden oluşmaktadır. Köprü ayağı temelinin

emniyetli tasarımı için, ayağın çevresindeki maksimum oyulma derinliğinin belirlenmesi gerekmektedir.

Birçok araştırmacı tarafından, köprü ayakları etrafında meydana gelen hız değişiklikleri ve bu değişikliklerin yapı üzerindeki etkileri irdelenmiştir [2-4]. Hız alanında meydana gelen ani değişikliklere bağlı olarak, köprü ayağının hemen membasında, basıncın yüksek olduğu bölgeden düşük olduğu bölgeye doğru yönelmiş düşey akım, serbest su yüzeyinde çevrinti ve dalgalanmalar, köprü ayağının etrafında at nalı çevrintileri ile birlikte ayağın mansabında kuyruk çevrintileri gözlemlenmiştir (Şekil 1) [5]. Laboratuvar ortamında yapılan fiziksel modellemelerin yanı sıra son yıllarda hızlı gelişme kaydeden hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri, çoklu vorteks (çevrinti) oluşumu ve kopması nedeniyle köprü ayakları etrafında meydana gelen karmaşık yapılu üç boyutlu akım alanının belirlenmesinde alternatif bir yöntem haline gelmiştir. Köprü ayakları etrafındaki

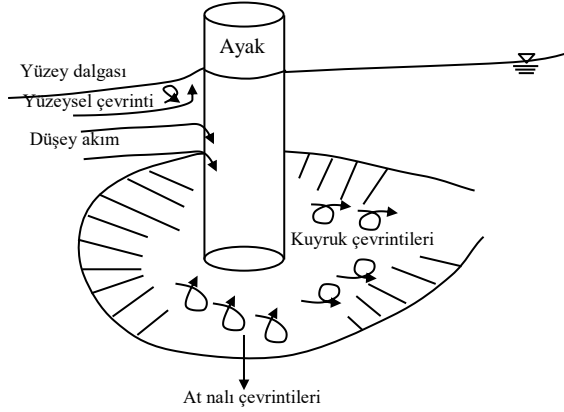
\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : oguzsimsek@cu.edu.tr

oyulmanın oluşumu sırasında akım alanı ve hareketli sınır tabakası arasında meydana gelen dinamik etkileşim, karmaşık akım alanı sorunlarının meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bu tür problemlerin çözümü için, araştırmacılar ve uygulayıcılar tarafından hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerine dayalı sayısal analiz programları sıklıkla kullanılmaktadır. Salaheldin ve arkadaşları [6], türbülans modellerinin dairesel köprü ayakları etrafındaki üç boyutlu, ayrılmış, girdaplı akım alanını modellemedeki performansını irdelemişlerdir. Sayısal analizlerde hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayalı ANSYS-Fluent programını kullanmışlardır.  $k-\varepsilon$  ve Reynolds Stress türbülans modellerini kullanarak elde ettikleri sayısal bulguları, literatürde mevcut olan deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar, hesaplanan ve ölçülen bulguların birbirleriyle gayet uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır. Duan [7], düşey silindirik köprü ayağı etrafındaki hidrodinamik akım alanını derinlik ortalamalı 2D modelini kullanarak modellemiş ve sayısal sonuçların doğruluğunu, Melville [8], Yanmaz ve Altınbilek [9]'in laboratuvar ölçümleri ile karşılaştırmıştır. Ayrıca sayısal sonuçlar Salaheldin ve arkadaşları [6] ve Ali ve Karim [10]'in üç boyutlu sayısal sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalardan, 2D derinlik ortalamalı modelin dairesel bir köprü ayağı etrafındaki taban kayma gerilmesini 3D model kadar başarılı modellediği sonucuna varılmıştır. Smith ve Foster [11], statik yatay silindir etrafındaki hidrodinamik akımı ve düzenli akıma maruz bırakılmış beş farklı statik oyulmuş taban profilini hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayalı FLOW-3D modelini kullanarak modellemişlerdir. Sayısal modellemelerde iki denklemlilik  $k-\varepsilon$  modelini ve Large Eddy Simülasyon (LES) modelini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda model sonuçlarının Jensen ve arkadaşları [12] tarafından elde edilen laboratuvar sonuçlarıyla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Ancak Large Eddy Simülasyon modelinin ayrılma bölgesini modellemede başarılı olmadığını, bunun yanında  $k-\varepsilon$  modelinin kayma gerilmelerinin yoğun olduğu bu bölgeyi başarılı bir şekilde modellediği sonucuna ulaşmışlardır. Huang ve arkadaşları [5], köprü ayağı etrafındaki türbülanslı akımda ölçek etkisini ve oyulmayı sayısal olarak analiz etmişlerdir. Silindirik köprü ayağı etrafındaki üç boyutlu akımın sayısal analizlerinde Fluent programından yararlanmışlardır. Fluent programı ile sayısal olarak elde edilen sonuçlar, küçük boyutlu köprü ayağı etrafındaki oyulmanın deneysel sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, Fluent yazılımının köprü ayakları etrafındaki akımı modellemede başarılı olduğunu belirtmişlerdir. Fayyadh ve arkadaşları [13], farklı akış hızları için, verev bir köprünün sonlu elemanlar yöntemi ile modellemesini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının temel amacı, akım hızlarının köprü ayaklarındaki oyulma derinliklerine etkisini belirlemektir. Laboratuvarında hidrolik bir model üzerinde deneyler yapmışlar ve köprü ayaklarındaki oyulmanın sayısal modellemesini sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir program kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Maksimum oyulma derinliklerinin deneysel ve sayısal karşılaştırma-

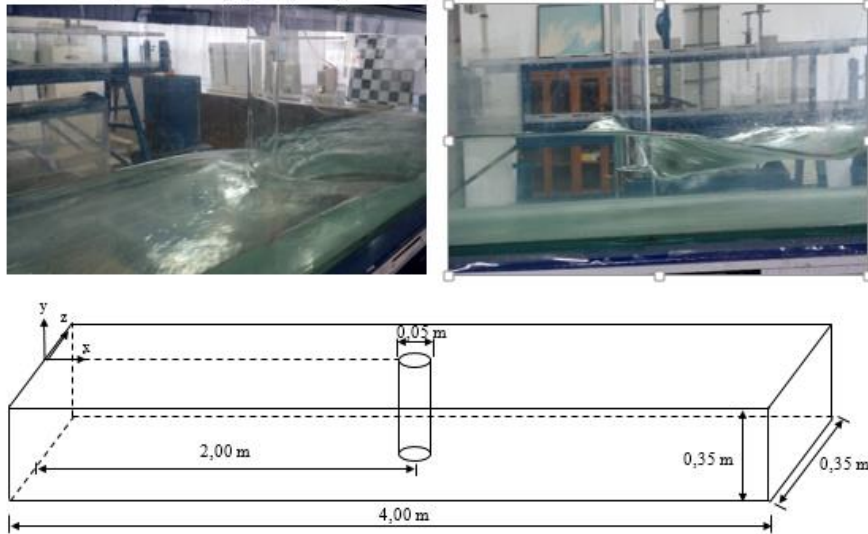
sından, deneylerde meydana gelen hidrodinamik akış yapısı ve hareketli oyulma sebebiyle, köprü ayakları etrafındaki sonuçların tutarsızlık gösterdiğini belirtmişlerdir. Zhu ve Liu [14], silindirik köprü ayağı etrafındaki yerel oyulma çukurunun belirlenmesi ve değerlendirilmesi için sayısal simülasyonlarda hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemini kullanmışlardır. Köprü ayağı etrafındaki üç boyutlu türbülanslı akımın sayısal modellemesinde, zamansal ortalamalı Navier Stokes denklemleri ile birlikte standart  $k-\varepsilon$  türbülans modelini tercih etmişlerdir. Köprü ayağı etrafında oluşan oyulma yapısı ve akım çizgileri sayısal olarak sunulmuş ve elde edilen sayısal bulguların deneysel bulgularla uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Demirci ve arkadaşları [15], dikdörtgen, silindirik ve trapez geometriye sahip köprü kenar ayağı etrafındaki akımın hız alanını belirlemek için FLOW- 3D bilgisayar programını kullanarak üç boyutlu sayısal modelleme yapmışlardır. Modelleme sonucu bulunan sayısal sonuçlar daha önce yapılmış deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve RNG ve  $k-\varepsilon$  yöntemleri ile yapılan çözümlerde genel olarak akıma ait hızların başarılı olarak modellendiği ifade edilmiştir. Özellikle cidara yakın kısımlarda, hızda ani değişimlerin ve çevrintilerin olduğu, yoğun türbülans hareketlerinin görüldüğü bölgelerde LES yönteminin daha sıkı çözüm ağı gerektirdiği belirtilmiştir. Afzal ve arkadaşları [16], sabit debili ve düzenli dalgalı farklı iki sınır koşulu için köprü ayağı etrafındaki oyulmayı ve çökelmeyi hesaplamak için üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemini kullanmışlardır. Serbest su yüzünün belirlenmesinde seviye ayarlama methodu (Level-set method-LSM) kullanılmıştır. Sayısal modellemeden elde edilen yerel oyulma derinliği deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda iki farklı durum için de sayısal modellemenin geometri, lokasyon ve maksimum oyulma derinliğini belirlemede başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Zhang ve arkadaşları [17], altı farklı dairesel silindir etrafındaki akımı, farklı modifikasyon durumunda Large Eddy Simülasyon modeli ile sayısal olarak modellemişlerdir. Sayısal modellemelerdeki hesaplamaların sınırlandırılması için Reynolds sayısını 5000'de sabitlemişlerdir. Elde edilen sonuçları ayrılma bölgesi özellikleri, aerodinamik kuvvetler, akış düzensizlikleri ve akış doğrultusu korelasyonları açısından karşılaştırmışlardır. Çalışmanın amacının, şekilsel olarak modifiye edilmiş silindirlerin kontrol mekanizmalarına ve bu modifikasyonlar sonucunda meydana gelen akımların kontrolüne bir ışık tutmak olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada, köprü ayağı etrafındaki türbülanslı akımın karakteristikleri sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Köprü ayağı etrafındaki açık kanal akımının hız alanı laboratuvar ortamında tek boyutlu Lazer Doppler Anemometresi (LDA) ile ölçülmüştür. Türbülanslı akımın hareketini idare eden temel denklemler, ANSYS-Fluent paket programı kullanılarak deney ile aynı akım koşulları altında sayısal olarak çözülmüştür. Sayısal çözümlerde Reynolds Ortalamalı Navier Stokes

denklemleri ile birlikte Standart k-ε, Renormalization k-ε ve Realizable k-ε türbülans kapatma modelleri kullanılmıştır. Sayısal modellemede kullanılan hesaplama ağ yapısının sayısal çözümler üzerindeki etkisini araştırmak için Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index-GCI) kullanılmıştır. Sayısal hesaplamalardan elde edilen çeşitli kesitlerdeki hız ve su yüzü profilleri deneysel ölçümlerle karşılaştırılmış, türbülans modellerinin, hız alanı ve serbest su yüzü profilinin belirlenmesindeki başarısı test edilmiştir.



Şekil 1. Bir köprü ayağı etrafındaki çevrıntiler ve oyulma çukuru (The vorticities and scour hole around a cylindrical pier)



Şekil 2. Deneysel düzeneği ve şematik gösterimi (Experimental set-up and schematic view)

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

### 2.1. Deneysel (Experiments)

Deneysel, Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarında bulunan hidrolik bakımından cıvalı, uzunluğu 4,0 m, genişliği ve yüksekliği 0,35 m olan cam duvarlı açık kanalda yapılmıştır. Şekil 2'de laboratuvar ortamındaki deney düzeneği ve onun şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü üzere kanalın başlangıcının 2 m mansabına, çapı (D) 0,05 m olan pürüzsüz bir silindirik köprü ayağı yerleştirilmiştir. Köprü

ayağı etrafındaki serbest su yüzünün deneysel olarak ölçülmesinde limnometre kullanılmıştır. LDA ile yapılan hız ölçümleri, akımın debisinin  $Q=0,0127 \text{ m}^3/\text{s}$  olduğu akım koşulunda gerçekleştirilmiştir. Açık kanaldaki akımın hidrolik yarıçapına bağlı Reynolds sayısı  $Re_h (=4V_h R_h/\nu) \approx 90.850$  olarak hesaplanmıştır ( $R_h$  hidrolik yarıçap ve  $\nu$  kinematik viskozitedir). LDA sistemi, ortalama hız ve hız sapıncı değerlerini %95 doğruluk mertebesinde belirlemektedir.

### 2.2. Temel Denklemler (Governing Equations)

Üç-boyutlu, sıkışmayan, türbülanslı açık kanal akımının hareketini idare eden temel eşitlikler, kütle ve momentumun korunumu (Reynolds-ortalama Navier-Stokes) eşitlikleri aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \rho g_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

(1) ve (2) eşitliklerinde  $u_i$ ,  $x_i$  doğrultusundaki hız bileşeni,  $g$  yer çekimi ivmesi,  $p$  basınç,  $\mu$  dinamik viskozite,  $\rho$  akışkan yoğunluğu ve  $\tau_{ij}$  türbülans (Reynolds) gerilmeleridir. Bu çalışmaya konu olan üç boyutlu akımı idare eden yukarıdaki 4 adet eşitlik 10 adet bilinmeyen içermektedir, bunlar: üç hız bileşeni  $\bar{u}_i$ , basınç  $\bar{p}$  ve 6

bağımsız Reynolds gerilmesidir ( $\overline{\rho u'_i u'_j}$ ). Böylece, eşitlik sisteminin çözülebilmesi için türbülans gerilmelerinin tanımlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu sorun, yukarıdaki zamansal-ortalama eşitliklerinin sayısal çözümünü sürecinde, eşitliklerde yer alan türbülans gerilmelerinin uygun türbülans kapatma modelleriyle tanımlanmasını gerektirmektedir. Türbülans viskozitesinin doğrusal olarak ifade edilmesini esas alan Boussinesq yaklaşımına göre (2) eşitliğindeki türbülans kayma gerilmeleri bünye eşitliği ile, sıkışmayan akımlar için aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

burada  $u'_i$  ve  $u'_j$  yatay ve düşey türbülans hız sapıncıları,  $\mu_t$  türbülans viskozitesi,  $k$  ( $= \overline{u'_i u'_i} / 2$ ) türbülans kinetik enerjisi ve  $\delta_{ij}$  Kronecker deltasıdır.

### 2.3. Türbülans Modelleri (Turbulence Models)

Eşitlik (3)'de görülen  $\mu_t$  türbülans viskozitesinin hesaplanmasında Reynolds Ortalamalı Navier Stokes denklemlerinin (RANS) çözümüne dayalı Standart  $k-\varepsilon$  (SKE), Renormalization Group  $k-\varepsilon$  (RNG) ve Realizable  $k-\varepsilon$  (RKE) türbülans kapatma modelleri kullanılmıştır.

#### 2.3.1. Standart $k-\varepsilon$ Türbülans Modeli (SKE)

(Standard  $k-\varepsilon$  Turbulence Model)

Standart  $k-\varepsilon$  modeli RANS denklemlerinin çözümünde ilk olarak öne sürülen ve sıklıkla kullanılan iki denklemlilik türbülans modellerinin başında gelmektedir. Bu model türbülans özelliklerinin ortalama akış ve difüzyon yoluyla taşınımının, türbülans üretiminin ve dağıtımının genel bir tanımlamasını içermektedir. Bu modelin daha küçük basınç gradyanlarına sahip serbest kayma tabakalı akımlar için daha kullanışlı olduğu bilinmektedir. Benzer şekilde duvar sınırlı ve iç akış koşulları için yalnızca ortalama basınç gradyanlarının küçük olduğu durumlarda daha iyi sonuçlar verdiği rapor edilmiştir [18].

Bu modelde türbülans viskozitesi  $\mu_t$  şu şekilde ifade edilir:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

burada  $C_\mu$  türbülans modeli sabitidir.

SKE modelinde, türbülans kinetik enerjisi ( $k$ ) ve onun kayıp oranı "dissipasyonu" ( $\varepsilon$ ) için iki adet transport denklemi, Reynolds denklemlerine ek olarak çözülmektedir. Bu transport denklemleri  $k$  ve  $\varepsilon$  için sırası ile şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (6)$$

Bu modelde  $R=0$  olup, deneysel sabitleri  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1,92$ ,  $C_\mu = 0,09$ ,  $k$  ve  $\varepsilon$  için türbülans Prandtl sayıları  $\sigma_k = 1,0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ 'tür [18].

#### 2.3.2. Renormalization Group $k-\varepsilon$ Türbülans Modeli (RNG) (Renormalization Group $k-\varepsilon$ Turbulence Model)

RNG  $k-\varepsilon$  türbülans modeli Yakhov ve Orszag [19] tarafından düşünülmüş ve geliştirilmiş yine iki denklemlilik

bir model olup esas itibariyle Navier-Stokes denklemlerinden renormalization group teorisi kullanılarak elde edilmiştir[20]. Bu modelde  $k$  ve  $\varepsilon$  için transport denklemleri Eşitlikler 5 ve 6'daki gibi yazılabilir. Temel farkı, sabitlerin farklı olması ve ilave terimlerin gelmesidir. RNG  $k-\varepsilon$  modelinin Standart  $k-\varepsilon$  modeline göre en büyük farkı,  $\varepsilon$  denklemine ilave olarak gelen  $R$  terimidir. Bu terim,

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

ifadesi ile hesaplanır. Bu terim eşitlik 6'da yerine koyulursa türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı  $\varepsilon$  denklemini şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

Eşitlikteki  $C_{2\varepsilon}^*$  terimi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (9)$$

burada  $\eta$ , türbülans kinetik enerjisinin üretimi ve kayıp oranının bir fonksiyonu olup şekil değiştirme tensörü  $S$  parametresini içermektedir. Bu ilave terim, SKE modelinde olmayan, yüksek kayma oranları ve akım çizgisi eğriliklerini göz önüne alması açısından önemlidir. Bu modelde kullanılan sabitler  $C_{1\varepsilon}=1,42$ ,  $C_{2\varepsilon}=1,68$ ,  $C_\mu=100$ ,  $\eta_0=4,38$ ,  $\beta=0,012$ ,  $C_\mu=0,0845$ 'dir.

#### 2.3.3. Realizable $k-\varepsilon$ Türbülans Modeli (RKE)

(Realizable  $k-\varepsilon$  Turbulence Model)

Akım alanındaki yüksek şekil değiştirme hızlarının ve sınır tabakası ayrılmasının mevcut olduğu karmaşık akım durumlarında SKE modeli üzerinde, performans artırıcı olarak RKE modeli adı altında şu iyileştirmeler yapılmıştır: (a) türbülans viskozitesi,  $\mu_t$ , ifadesinde, sabit bir değer yerine değişken  $C_\mu$  terimi kullanılarak SKE modelindeki katı yüzeye dik şekil değiştirme bileşenlerinin değeri küçültülmüş, ve (b)  $\varepsilon$  transport denkleminde yerel şekil değiştirme hızını esas alan farklı bir kaynak terimi kullanılmıştır. Shih ve arkadaşları [21],  $C_\mu^*$  için aşağıdaki formülü vermişlerdir:

$$C_\mu^* = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon}} \quad (10)$$

Burada,  $A_0 = 4$ ,  $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$ ,  $\phi = \frac{1}{3} \arccos(\sqrt{6}W)$ ,

$$W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, \quad U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}},$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k^*, \quad \Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k^*,$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} (\bar{u}_{i,j} - \bar{u}_{j,i})$$

$\bar{\Omega}_{ij}$ ,  $\omega_k^*$  açısal hızı ile dönen eksen takımına göre ölçülen ortalama rotasyon hızı tansördür.

$\varepsilon$ -denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \bar{u}_j \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (11)$$

Model sabitleri aşağıdaki gibi önerilmiştir:

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{S_{ij} S_{ij}},$$

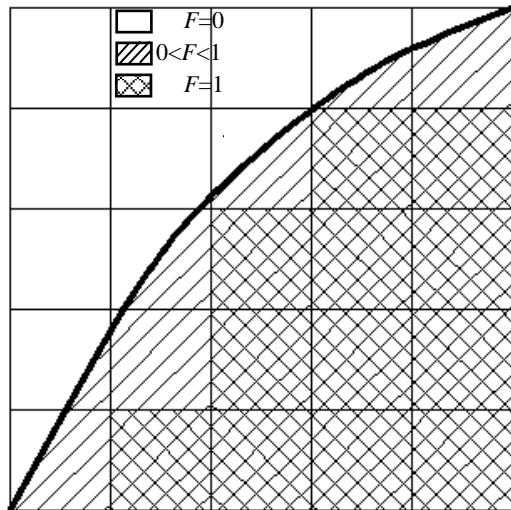
$$C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.2$$

RKE modeli, ivmelenen, eğrisel, sınır tabakasının ayrıldığı, ikincil akımların var olduğu akımlarda SKE modeline göre daha başarılı olduğu ifade edilmiştir [21].

## 2.4. Akışkan Hacimleri Yöntemi

(Volume of Fluid Method -VOF)

Akışkan hacimleri yöntemi, sabit basınçlı serbest bir akış alanının yüzey sınırının şeklini ve yerini belirlemede sıklıkla kullanılan bir yöntemdir [22]. Bu çalışmada su-hava ara kesitinin hesabında akışkan hacimleri yöntemi (Volume of Fluid, VOF) kullanılmıştır. VOF yöntemi hücrelerin boş, kısmen ya da tam suyla dolu olduğunu belirlemede kullanılmaktadır. Hacimsel doluluk oranını temsilen bir akışkan hacmi (F) tanımlanır.  $F=1$  için ağ elemanı tam dolu,  $F=0$  için boş (hava ile dolu) ve  $0 < F < 1$  için ağ elemanı kısmen dolu olmaktadır (Şekil 3). Akışkan Hacimleri Yöntemi ile serbest su yüzünün hesaplanmasında "Geo-Reconstruct" yaklaşımı kullanılmıştır [23].



Şekil 3. Ağ elemanlarının doluluk oranı (Coverage rate of grid elements)

## 2.5. Çözüm Bölgesinin Sınır Şartları

(Boundary Conditions of Solution Domain)

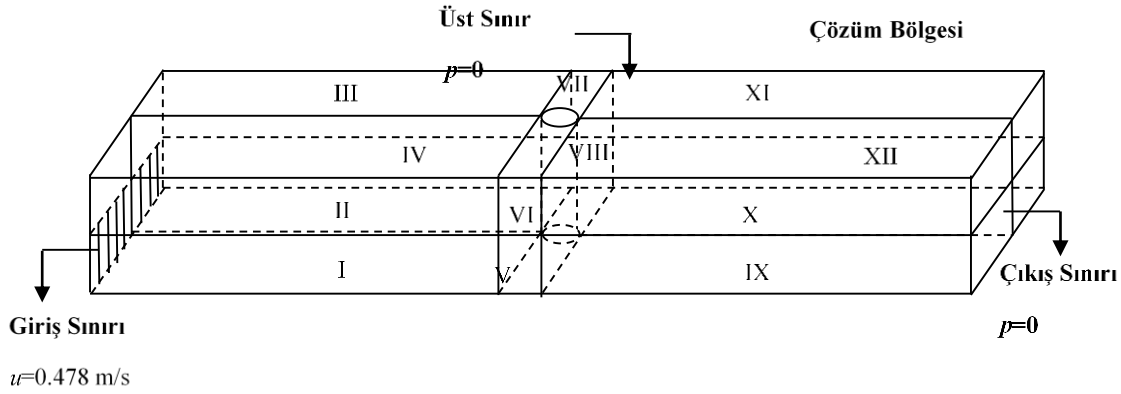
Kullanılan koordinat sisteminin orijini, çözüm bölgesinin sol alt köşesi olarak alınmıştır. Şekil 4'te verilen çözüm bölgesinin üst sınırı ve çıkış bölgesinin sınır şartı sıfır

basınç ( $p=0$ ), kanal tabanında ve savak alt tabanında sıfır hız sınır şartı, yani  $u=0$ ,  $v=0$  olarak tanımlanmıştır. Akım durumunda sayısal modelde giriş sınır şartı olarak yatay hız bileşeni için üniform hız ( $u=0,478$  m/s) dağılımı kullanılmıştır. Düşey hız bileşeni ise  $v=0$  olarak tanımlanmıştır. Zamana bağlı çözüm sürecinde, başlangıç şartı olarak, çözüm bölgesinin giriş sınırında doluluk oranı  $F=1$ , diğer bölgeler ve çözüm bölgesinin çıkış sınırında ise  $F=0$  alınmıştır. Sayısal modellemede hız basınç eşleşmesi için genel olarak zamana bağlı simülasyonlar için kullanılan SIMPLE (basınç-bağımlı denklemler için yarı kapalı yöntem-Semi-implicit method for pressure-linked equations) algoritması kullanılmıştır [24]. Momentum, türbülans kinetik enerji ve türbülans kinetik enerji kayıp oranı denklemleri için birinci dereceden ayrıklaştırma şeması (first-upwind discretization scheme) ve basıncın ayrıklaştırılması için PRESTO (kademeli basınç seçeneği-pressure staggered option) algoritması kullanılmıştır. Türbülans modelleri için zaman adımı  $\Delta t=0,001$  s olarak seçilmiş ve sayısal çözümün kararlı hale geldiği 25s kadar çözüm yapılmıştır. SKE, RNG ve RKE modellerinde, kanal tabanında katı sınıra yakın akım bölgesinin modellenmesinde Chen ve Patel [25] tarafından önerilen iki-tabakalı çözümü esas alan ve genişletilmiş iki-tabakalı duvar-yakını modellemesi olarak anılan yöntem kullanılmıştır. (1) ve (2) temel eşitliklerinin, Şekil 3'te görülen sınır şartlarına göre  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  ve  $\bar{p}$  için sayısal çözümü, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent® v.12.1 paket programı kullanılarak yapılmıştır.

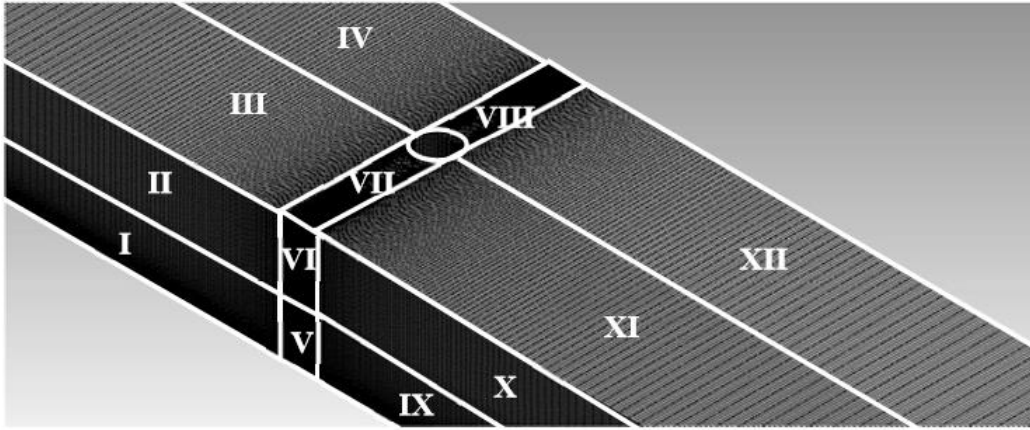
## 2.6. Hesaplama Ağının Tasarımı (Design of Computational Grid)

Serbest yüzeyli açık kanal akımı içerisine yerleştirilmiş bir yapı etrafındaki türbülanslı akımın sayısal hesaplamalarında, hesaplama ağı yapısının elde edilen sayısal sonuçlar üzerinde etkili olduğu bilinen bir gerçektir. Bu çalışmadaki probleme uygun hesaplama ağının oluşturulmasında, edinilen deneyimlere bağlı olarak, katı sınırlara doğru ve yüzey profilinde hızlı değişimin söz konusu olduğu bölgelerde hesap ağı sıklaştırılmıştır. Akımın karakteri göz önüne alınarak, Şekil 4'te verilen sayısal çözüm bölgesi, Şekil 5'te görüldüğü gibi, 12 alt bölgeye ayrılmıştır. Her bir alt bölgede eleman sayısı yaklaşık olarak %50 ve %75 artırılmak suretiyle, lineer dörtgen elemanlardan oluşan 3 farklı yoğunluğa sahip ağ yapıları (Ağ-1, Ağ-2, Ağ-3) elde edilmiştir. Sayısal çözüm alanındaki ağ yapısının yeterli sıklıkta olup olmadığı, bir başka ifadeyle ağ yapısından bağımsız sayısal çözümler elde etmek amacıyla ele alınan üçlü ağ sisteminde yapılan sıklaştırmanın uygunluğu, Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index-GCI) yöntemiyle test edilmiştir [26, 27]. Ağ-3 sistemiyle, akım hızlarındaki hataların kabul edilebilir bir sınır olan % 2'den küçük olduğu görülmüş ve hesaplama hassasiyetinin ağ yoğunluğundan bağımsızlaştığı kanaatine varılmıştır.





Şekil 4. Sayısal çözüm bölgesi ve sınır şartları (Solution domain and boundary conditions)



Şekil 5. Sayısal modelde kullanılan hesaplama ağı ve alt bölgeleri (Computational grid and sub-domains in the numerical models)

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1. Deneysel ve Hesaplanan Hız Profilleri

(Experimental and Numerical Velocity Profiles)

Bu çalışmada kullanılan SKE, RNG ve RKE modellerinin başarılarının kıyaslanması bağlamında, deneysel ve sayısal hesap bulgularının niceliksel olarak karşılaştırılmasında, hız ve su yüzü profilleri için Eşitlik 12 ve 13'de sırasıyla verilen *Ortalama Karesel Hata* (OKH) ve *Ortalama Mutlak Göreceli Hata* (OMGH) değerleri ölçüt olarak alınmıştır:

$$OKH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (v_d - v_h)^2 \quad (12)$$

$$OMGH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{v_d - v_h}{v_d} \right| \times 100 \quad (13)$$

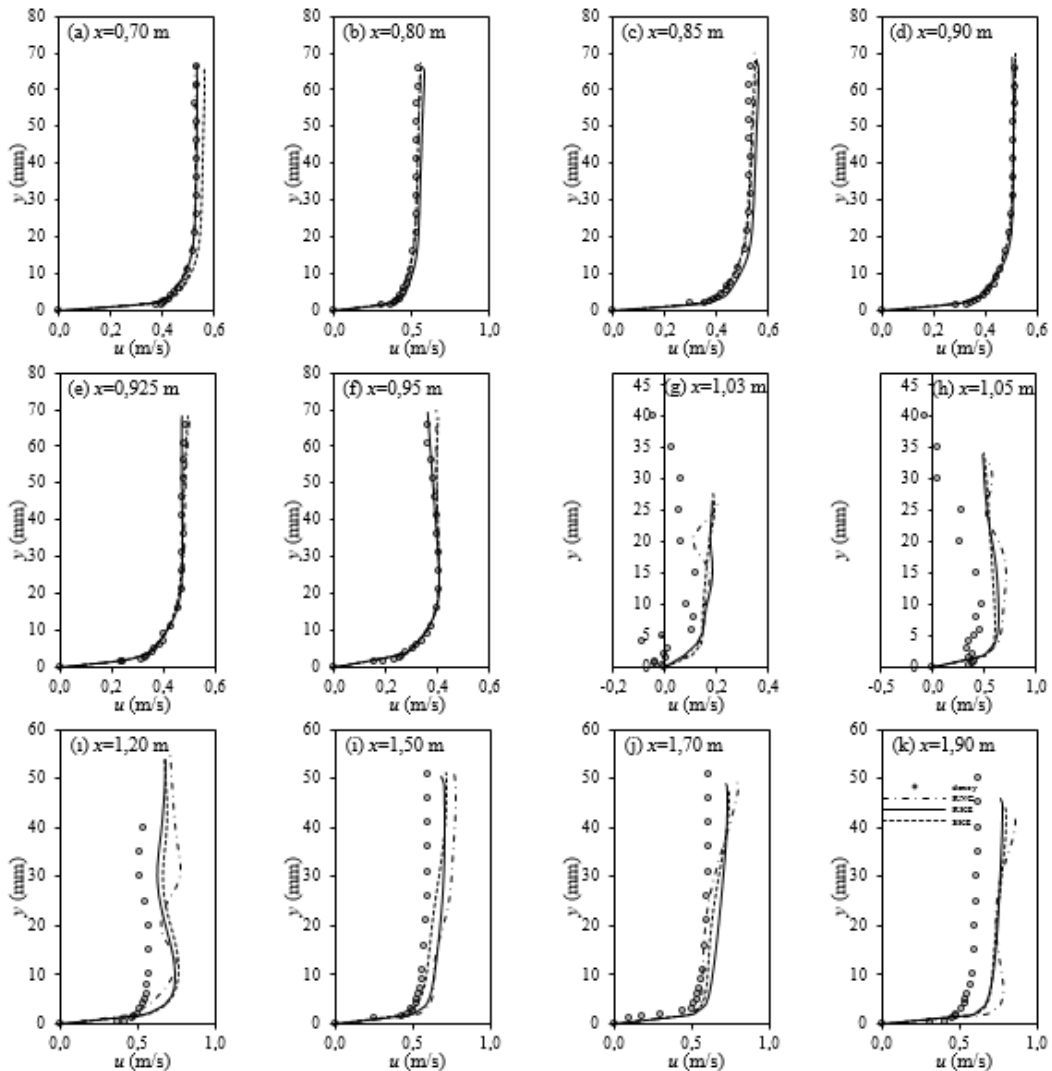
burada,  $v_d$  ve  $v_h$  sırasıyla deneysel ve hesaplanan hız veya su yüzü değerlerini,  $N$  işlem yapılan hız veya su yüzü profilinde ele alınan nokta sayısını göstermektedir. Çizelge 1'de, SKE, RNG ve RKE türbülans modelleri kullanılarak, farklı kesitlerden elde edilen sayısal hız profillerinin deneysel bulgularla karşılaştırılmasından elde edilen OKH ve OMGH değerleri verilmiştir.

Çizelgenun son satırında, tüm kesitler göz önünde bulundurularak elde edilen ortalama OKH ve OMGH değerleri sunulmuştur. Bu değerler incelendiğinde, tüm çözüm bölgesini kapsayacak şekilde, RKE türbülans modelinin ölçüm yapılan kesitlerin tümünde hem OKH hem de OMGH değerlerine göre, SKE ve RNG modellerinden daha başarılı olduğu görülmektedir.  $x=1,03$  m ve  $x=1,05$  kesitleri köprü ayağı yapısının hemen mansabında elde edilen hız profillerini göstermektedir. Burada meydana gelen karmaşık akım yapısının sayısal olarak doğru modellenemediği, bu kesitlerde elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin büyüklüğünden de açıkça görülmektedir. Akım yapısının daha düzenli olduğu memba bölgesinde ise sayısal bulguların deneylerle gayet uyumlu olduğu söylenebilir. Sonuç olarak köprü ayağı etrafındaki türbülanslı akımın modellenmesinde RKE türbülans modelinin, kullanılan diğer modellere göre deneysel ölçümlerle daha uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Şekil 6'da, kanalın farklı kesitlerindeki SKE, RNG ve RKE türbülans modellerinden hesaplanan sayısal hız profilleri ile deneysel olarak ölçülen hız profilleri sunulmuştur. Bu grafiklerden, köprü ayağı membasındaki  $x=70, 85, 90, 92,5$  ve  $95$  cm kesitlerinde, Çizelge 1'den de anlaşıldığı gibi, tüm türbülans modellerinin

**Çizelge 1.** Hesaplanan hız profilleri için OKH ( $m^2/s^2$ ) ve OMGH (%) değerleri  
(Calculated MSE ( $m^2/s^2$ ) and MARE (%) values for the velocity profiles)

x (cm)	SKE		RNG		RKE	
	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
70	0,0005	4,08	0,0004	2,19	0,0003	2,12
80	0,0002	2,14	0,0002	2,24	0,0009	5,67
85	0,0001	1,75	0,0001	2,00	0,0004	3,94
90	0,0002	2,25	0,0002	1,79	0,0001	1,57
92,5	0,0002	2,12	0,0002	2,30	0,0002	2,06
95	0,0003	3,77	0,0004	4,13	0,0002	2,75
103	0,0094	660,01	0,0078	581,04	0,0095	535,94
105	0,0759	213,72	0,1101	246,97	0,0800	213,69
120	0,0243	28,25	0,0302	29,70	0,0165	23,23
150	0,0075	12,42	0,0190	22,40	0,0103	16,81
170	0,0070	11,33	0,0070	9,73	0,0075	14,38
190	0,0220	24,59	0,0348	30,66	0,0201	23,71
Ort.	80,53	0,0123	77,92	0,0175	70,49	0,0122

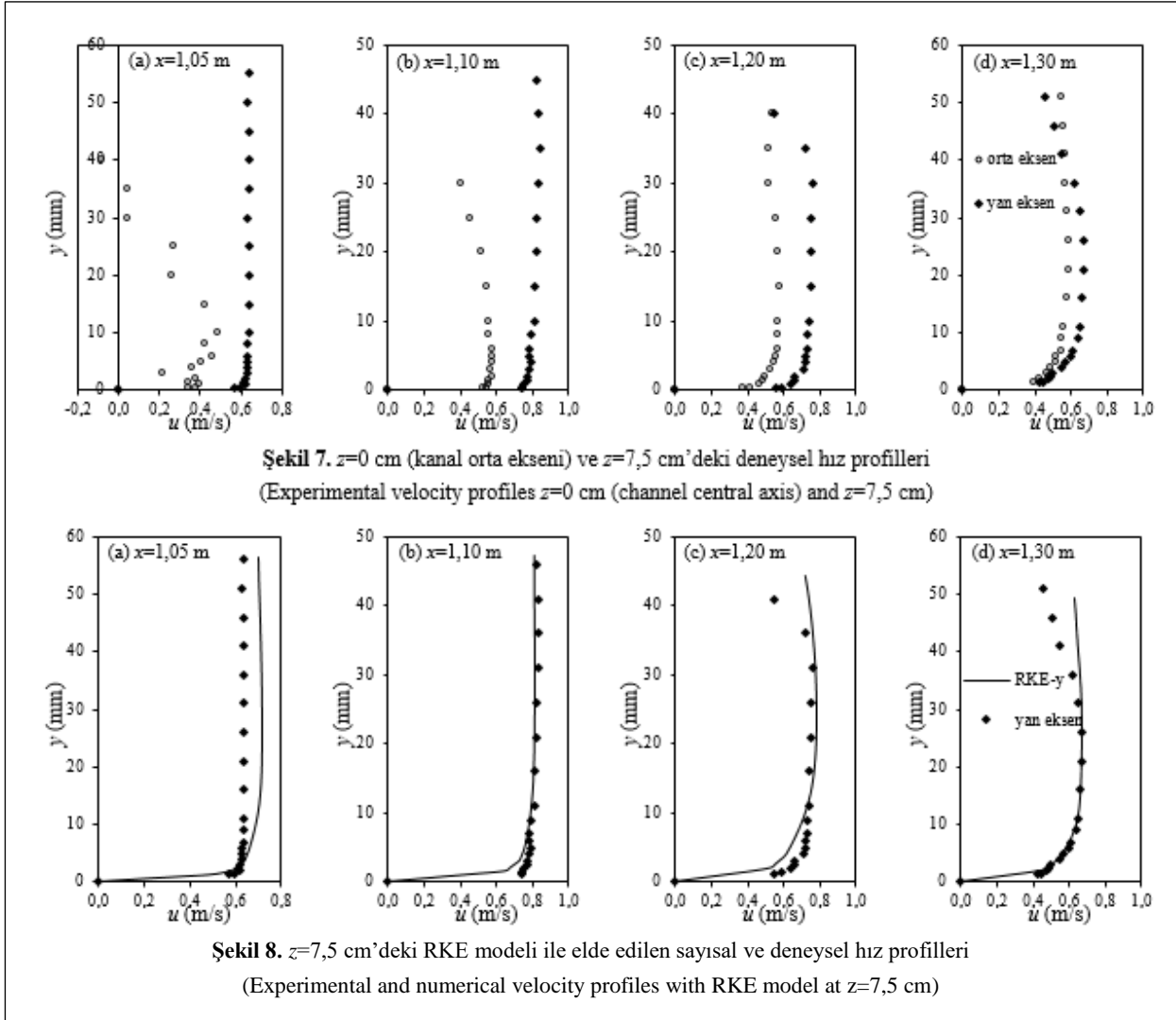


**Şekil 6.** Kanalin farklı kesitlerindeki SKE, RNG ve RKE ile elde edilen sayısal ve deneysel hız profilleri

(Experimental and numerical velocity profiles with SKE, RNG and RKE models in different sections of the channel)

deneylemlerle gayet uyumlu olduğu görülebilmektedir. Ancak köprü ayağının mansap bölgesine gelindiğinde, burada meydana gelen karmaşık akım yapısı,

kullanılan tüm türbülans modellerinin çok da başarılı bir şekilde modelleyemediği anlaşılmaktadır.

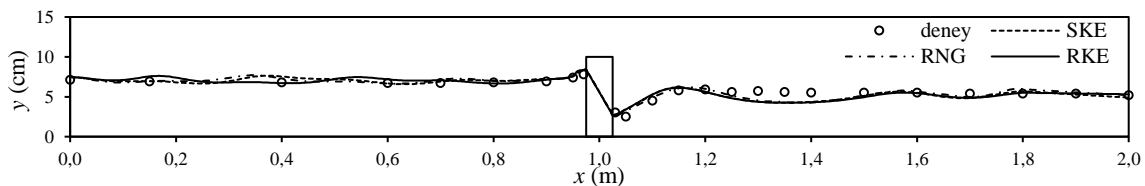


Şekil 7'de kanalın orta ekseninde ( $z=0$  cm) ve orta eksenden kanal duvarına doğru 7,5 cm mesafede ( $z=7,5$  cm) ölçülen deneysel hız profilleri karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerden köprü ayağı mansabında meydana gelen oylulma çukurunun kanal duvarına doğru etkisini kaybettiği görülebilmektedir. Ayrıca  $x=1,30$  m kesitinde, oylulma bölgesinin etkisinin hemen hemen kaybolduğu ve kanal duvarına yakın bölgede elde edilen deneysel hız

profilleri ile karşılaştırılması verilmiştir. Bu grafiklerden, RKE modelinin deneylerle uyumlu olduğu söylenebilir.

### 3.2. Deneysel ve Hesaplanan Su Yüzü Profilleri (Numerical and experimental free surface profiles)

Silindir köprü ayağı etrafındaki akımın serbest su yüzünün belirlenmesinde VOF metodu kullanılmıştır. Şekil 9'da farklı türbülans kapatma modelleri ile kanalın orta kesitinde elde edilen sayısal ve deneysel su yüzü



**Şekil 9.** Sayısal ve deneysel su yüzü profilleri (Numerical and experimental free surface profiles)

profilinin orta eksendeki deneysel hız profiline yaklaştığı, ancak duvar etkisinden dolayı da tam olarak benzeşmediği görülmektedir. Şekil 8'de ise köprü ayağı mansabında,  $z=7,5$  cm'de ölçülen deneysel hız profillerinin, bu çalışmada en başarılı türbülans modeli olarak belirlenen RKE modelinden elde edilen hız

profilleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, hız profillerine göre en başarılı türbülans modeli olarak belirlenen RKE modelinin yanı sıra SKE ve RNG türbülans modellerinin de akım profilini tahmin etmede başarılı olduğu söylenebilir. SKE, RNG ve RKE türbülans modellerinin, köprü ayağı mansabında meydana gelen akış yapısını ve ayağın membasındaki

durma noktasını doğru bir şekilde tahmin ettiği görülmektedir.

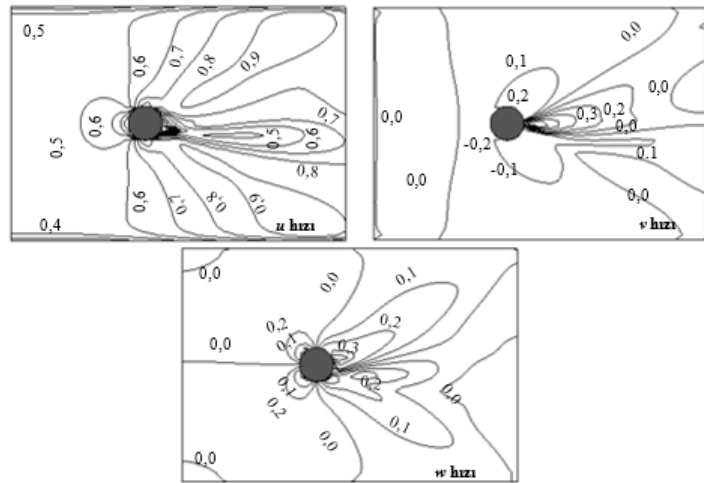
### 3.3. Sayısal Hız Bileşenleri ve Basınç Dağılımı

(Numerical Velocity Components and Pressure Distribution)

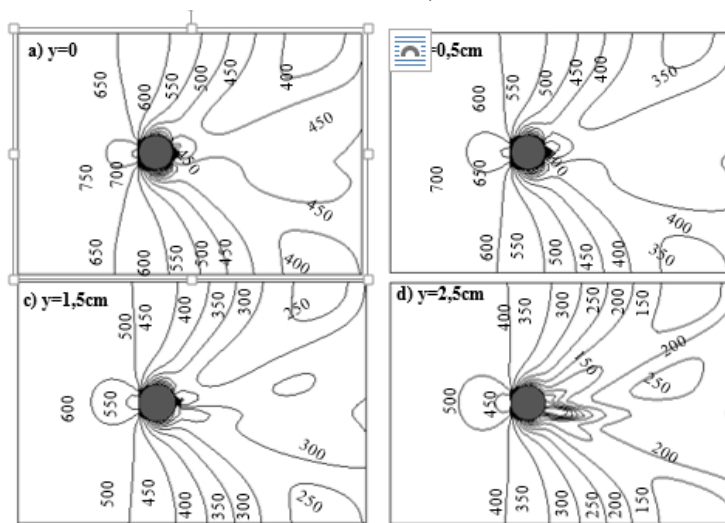
Şekil 10'da, kanal tabanının 2,5 cm üzerindeki yatay kesitte, RKE türbülans modelinden elde edilen  $x$ ,  $y$  ve  $z$  doğrultusundaki hız bileşenlerinin dağılımı görülmektedir. Hız bileşenlerinin maksimum değerleri silindirik köprü ayağı mansabında oyulma bölgesinde elde edilmiştir.  $v$  ve  $w$  hız bileşenleri burada belirginleşmiştir. Bir başka ifade ile köprü ayağının mansabında, akımın üç boyutluluğu diğer bölgelere kıyasla daha hakimdir. Şekil 11'de RKE türbülans modelinden elde edilen köprü ayağı etrafında, kanal tabanından farklı yüksekliklerdeki ( $y=0$ , 0,5, 1,5, 2,5 cm) basınç dağılımlarının plan görünüşleri verilmektedir. Verilen basınç dağılımlarından, beklenildiği gibi, kanal tabanına yaklaştıkça basınç değerlerinin

türbülans modelinden elde edilen, köprü ayağı etrafında kanal tabanından farklı yüksekliklerdeki ( $y=0$ , 0,5, 1,5, 2,5 cm) türbülans kinetik enerji dağılımının plan

görünüşleri verilmektedir. Türbülans kinetik enerjisinin tabandan su yüzüne yükseldikçe artış gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebinin köprü ayağı mansabında meydana gelen karmaşık akım yapısı ve  $y$  ve  $z$  doğrultularındaki hız bileşenlerinin daha aktif hale gelmesi olduğu söylenebilir. Ayrıca türbülans kinetik enerjisinin maksimum büyüklüğüne tüm yüksekliklerde oyulma çukurunun meydana geldiği bölgede ulaştığı açıkça görülmektedir. Şekil 13'te RKE türbülans modelinden elde edilen kanalın orta eksenindeki türbülans kinetik enerji konturları, akım çizgileri ve hız vektörleri verilmiştir. RKE türbülans modelinden elde edilen sayısal akım çizgileri ve hız vektörleri akımın topolojisini yansıtmaktadır. Çevrinti bölgesi, durma



Şekil 10. Tabandan  $y=2,5$  cm yükseklikteki  $u$ ,  $v$ ,  $w$  hız konturları ( $u$ ,  $v$ ,  $w$  velocity contours at  $y = 2,5$  cm height from the channel base)



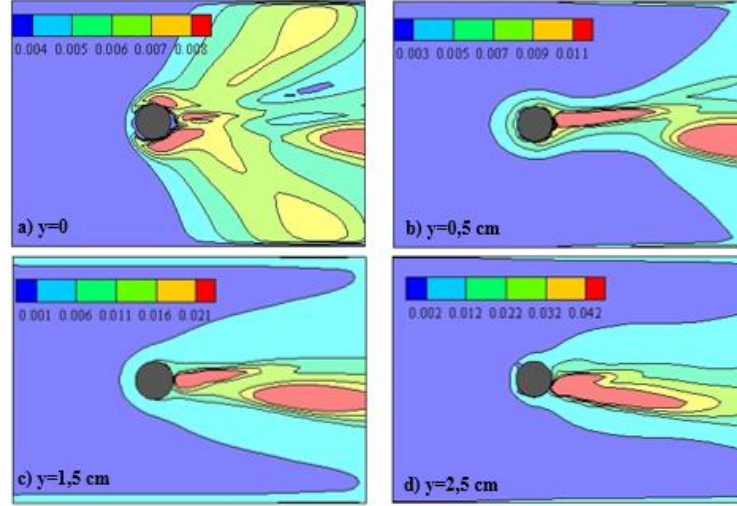
Şekil 11. Farklı derinliklerdeki basınç dağılımları (Pressure distributions at different depths)

arttığı görülebilmektedir. Derinlik boyunca basınç maksimum değerine köprü ayağının hemen membasındaki durma çizgisi boyunca ulaşmaktadır. Şekil 12'de RKE

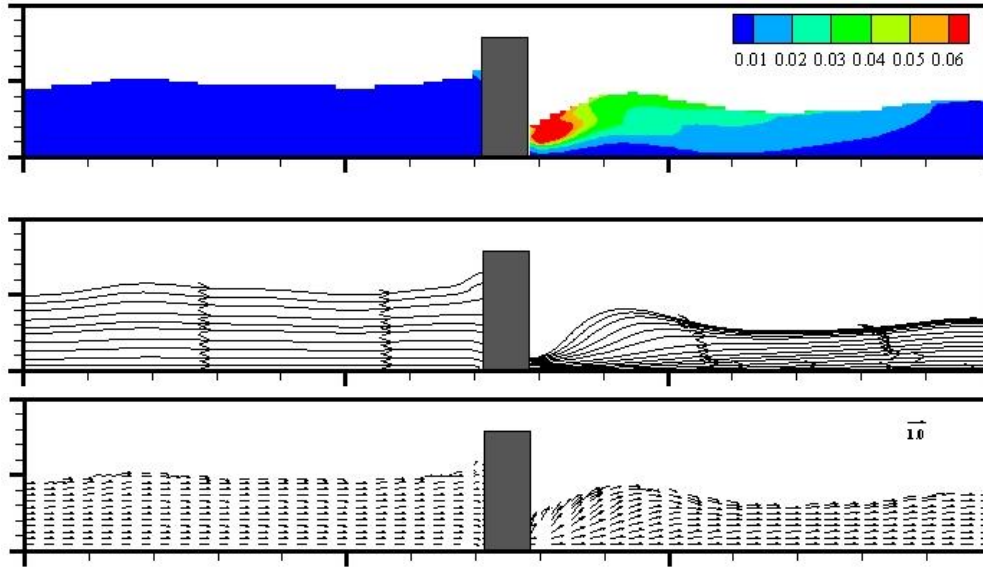
noktası ve iki boyutlu akım bölgesi akım çizgileri ve hız vektörlerinden açıkça görülmektedir. Hız bileşenlerine benzer şekilde, türbülans kinetik enerjisi de silindirik köprü

ayağının hemen mansabında maksimum değere ulaşmaktadır. Mansaba doğru gidildikçe türbülans kinetik enerji azalmaktadır. Memba bölgesinde ise rölatif olarak daha düşük değerlere sahip türbülans kinetik enerji dağılımı söz konusudur.

karşılaştırılmasından RKE türbülans modelinin akım hız alanını ve serbest su yüzünü belirlemede diğer türbülans modellerine göre daha başarılı olduğu görülmüştür. Dairesel en kesite sahip düşey silindirik köprü ayağı etrafındaki akım ile ilgili karakteristiklerin, özellikle



Şekil 12. Farklı derinliklerdeki türbülans kinetik enerji dağılımları (Turbulence kinetic energy distributions at different depths)



Şekil 13. RKE türbülans modelinden elde edilen: a) türbülans kinetik enerji, b) akım çizgileri, c) hız vektörleri (a: Turbulence kinetic energy distributions, b: Streamline, c: Velocity vectors obtained from RKE turbulence model)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada dairesel en kesite sahip silindirik köprü ayağı etrafındaki türbülanslı akım alanı, Standart  $k-\epsilon$ , Renormalization Grubu  $k-\epsilon$  ve Realizable  $k-\epsilon$  türbülans kapatma modelleri kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Silindir köprü ayağı etrafındaki üç boyutlu türbülanslı akışı idare eden temel denklemler, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent programını kullanılarak çözülmüştür. Sayısal olarak elde edilen bulgular, laboratuvarla ölçülen deneysel hız ve su yüzü profilleri ile karşılaştırılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçların OKH ve OMGH değerlerine bağlı olarak

ayağın hemen mansabında daha ön plana çıktığı belirlenmiş; bu tür yapıların tasarımı açısından, daralma kesitinde ve hemen sonrasında akım ile ilgili parametrelerin üç boyutlu olarak değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi tarafından FBA-2016-6126 nolu proje ile desteklenmektedir. Desteklerinden dolayı Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederiz.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Yanmaz, A.M., "**Köprü Hidroliği**", ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., ANKARA, (2002).
- [2] Richardson, J.E. and Panchang, V.G., "Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(5): 530-540, (1998).
- [3] Melville, B.W. and Coleman, S.E., "**Bridge scour**", Water Resources Publication, Colorado, U.S.A.,(2000).
- [4] Kirkil, G., Constantinescu, G. and Ettema, R., "Detached eddy simulation investigation of turbulence at a circular pier with scour hole", *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(11): 888-901, (2009).
- [5] Huang, W., Yang, Q. and Xiao, H., 2009. "CFD modeling of scale effects on turbulence flow and scour around bridge piers", *Computers & Fluids*, 38(5): 1050-1058, (2009).
- [6] Salaheldin, T.M., Imran, J. and Chaudhry, M.H., "Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(2): 91-100, (2004).
- [7] Duan, J.G., "Two-dimensional model simulation of flow field around bridge piers", *Impacts of Global Climate Change*: 1-12, (2005).
- [8] Melville, B.W., "**Local scour at bridge sites**", researchspace@auckland, (1975).
- [9] Yanmaz, A.M. and Altinbilek, H.D., "Study of time-dependent local scour around bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(10): 1247-1268, (1991).
- [10] Ali, K. H. and Karim, O., "Simulation of flow around piers", *Journal of Hydraulic Research*, 40(2): 161-174, (2002).
- [11] Smith, H.D. and Foster, D.L., "Modeling of flow around a cylinder over a scoured bed", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 131(1): 14-24, (2005).
- [12] Jensen, B., Sumer, B., Jensen, H. and Fredsoe, J., "Flow around and forces on a pipeline near a scoured bed in steady current", *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 112(3): 206-213, (1990).
- [13] Fayyadh, M., Akib, S., Othman, I. and Razak, H.A., "Experimental investigation and finite element modelling of the effects of flow velocities on a skewed integral bridge", *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(9): 1795-1810, (2011).
- [14] Zhu, Z. and Liu, Z., "CFD prediction of local scour hole around bridge piers", *Journal of Central South University*, 19: 273-281, (2012).
- [15] Demirci, M., Kocaman, S. and Varlı, B., "Farklı geometrilerdeki köprü kenar ayakları etrafındaki hız dağılımının sayısal incelenmesi", *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(3): 161-173, (2012).
- [16] Afzal, M.S., Bihs, H., Kamath, A. and Arntsen, Ø.A., "Three-dimensional numerical modeling of pier scour under current and waves using level-set method", *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 137(3): 032001, (2015).
- [17] Zhang, K., Katsuchi, H., Zhou, D., Yamada, H. and Han, Z., "Numerical study on the effect of shape modification to the flow around circular cylinders", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 152: 23-40, (2016).
- [18] Launder, B.E. and Spalding, D.B., "**Lectures in Mathematical Models of Turbulence**", Academic Press, London, (1972).
- [19] Yakhot, V. and Orszag, S.A., "Renormalization-Group Analysis of Turbulence", *Physical Review Letters*, 57(14): 1722-1724, (1986).
- [20] Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. and Speziale, C.G., "Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique", *Physics of Fluids a-Fluid Dynamics*, 4(7): 1510-1520, (1992).
- [21] Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z.G. and Zhu, J., "A New Kappa-Epsilon Eddy Viscosity Model for High Reynolds-Number Turbulent Flows", *Computers & Fluids*, 24(3): 227-238, (1995).
- [22] Hirt, C.W. and Nichols, B.D., "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", *Journal of Computational Physics*, 39(1): 201-225, (1981).
- [23] ANSYS, "**Fluent Theory Guide**", ANSYS Inc. USA, (2012).
- [24] Patankar, S.V. and Spalding, D.B., "A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15(10): 1787-1806, (1972).
- [25] Chen, H. and Patel, V., "Near-wall turbulence models for complex flows including separation", *AIAA Journal*, 26(6): 641-648, (1988).
- [26] Çelik, I.B., Ghia, U., Roache, P.J. and Freitas, C.J., "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications", *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME*, 130(7), (2008).
- [27] Roache, P.J., "Verification of codes and calculations", *AIAA Journal*, 36(5): 696-702, (1998).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

# Alüminyum eloksal atıklarının yangın geciktirici olarak değerlendirilmesi

## *Evaluation of aluminum anodic oxidation wastes as flame retardant*

Yazar(lar) (Author(s)): Ayşe MURATHAN<sup>1</sup>, Emine BAYİS<sup>2</sup>, Ahsen KOÇ<sup>3</sup>, Hatice B.MURATHAN<sup>4</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-0965-8792

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-2801-0481

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-9140-2851

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0002-0491-098X

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(Tocitetothisarticle):** Murathan A., Bayis E., Koç A. ve Murathan H. B., "Alüminyum eloksal atıklarının yangın geciktirici olarak değerlendirilmesi", *Politeknik Dergisi*, 21(1): 149-154, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.386873

# Alüminyum Eloksal Atıklarının Yangın Geciktirici Olarak Değerlendirilmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Ayşe MURATHAN<sup>1\*</sup>, Emine BAYİS<sup>2</sup>, Ahsen KOÇ<sup>3</sup>, Hatice B. MURATHAN<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup> Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>4</sup> Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 21.01.2017 ; Kabul/Accepted : 17.04.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada alüminyum eloksal atıkları sunta türü kompozit panel malzemelerinde kullanılarak potansiyel alev geciktirme etkisi incelendi. Toz haline getirilen alüminyum eloksal atığına sıcak sudaki %10'luk polimerik bağlayıcı katılarak oluşturulan karışımlarda, kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) başta olmak üzere %1'lik çinkoborat (%45ZnO-%36B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve atık miktarı kadar sodyum bikarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ) sırasıyla kütle oranlarında katıldıktan sonra bağlayıcı eşliğinde sunta yüzeylere uygulandı ve kaplamalar 50°C'de 24 saat kurumaya bırakıldı. ASTM D 2863'e göre %27-38 O<sub>2</sub> besleme aralığında sınırlayıcı oksijen indeksi (LOİ) testi uygulandı, 180-200 saniye aralığında alev gecikme süreleri gözlemlendi. En uzun alev gecikme süresi %38 O<sub>2</sub> beslemesiyle 200 saniye olarak bulundu. LOİ testine göre yapılan sınıflandırmada bu değer için ekstra alev geciktirici olduğu belirlendi. Ayrıca bu kaplamalar -18°C ve 50°C'lik uç sıcaklıklarda 3 ay bekletildi, fiziksel görünümünde bir değişiklik olmadığı gözlemlendi. Kaplamalarda yapılan XRD analizinde her iki karışımda da yoğun olarak  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve eser düzeyde  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{MgO}$  gözlemlendi. Burada alüminyum bileşiklerinin alev geciktirici etkiye sahip olduğu tespit edildi. TG-DTA analizlerinde 568-778°C aralığında çinko borat içeren karışımda %38, sodyum bikarbonat içeren karışımda %37'lik kütle kayıpları gözlemlendi. Alüminyum eloksal atıklarının yangın geciktirici üretiminde kullanılabilirliğinin yanısıra insan sağlığı için zararsız ve çevre dostu olan kompozit paneller elde edildi.

**Anahtar Kelimeler:** Eloksal atığı, kostik, sunta, yangın geciktirici, LOİ

## Evaluation of Aluminum Anodic Wastes as Flame Retardant

### ABSTRACT

In this study, the effects of potential flame retardation were investigated using aluminum anodic waste in chipboard type composite panel materials. In the blends formed by adding a 10% polymeric binder in hot water to the powdered aluminum anodizing wastes, 1% zincborate (45% ZnO - 36% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), mainly calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ), and sodium bicarbonate ( $\text{NaHCO}_3$ ) as much as waste were respectively in mass ratios added to the chipboard coats and the coatings were left to dry at 50°C, 24 hours. A limiting oxygen index (LOI) test was performed at a feed rate of 27-38% O<sub>2</sub> according to ASTM D 2863 and flame retardance times of 180-200 seconds were observed. The longest flame retardance time was found to be 200 seconds with 38% O<sub>2</sub> feed. In the classification according to the LOI test it was determined that this value is an extra flame retardant. In addition, these coatings were held for 3 months at extreme temperatures of -18°C and 50°C, and there was no change in their physical appearance. In the XRD analysis of the coatings, intensely of  $\text{Al}(\text{OH})_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , trace amount of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  and  $\text{MgO}$  were observed in both mixtures. It has been found here that aluminum compounds have flame retardant effect. In the TG-DTA analysis, mass loss of 38% in the mixture of containing zinc borate and 37% in the mixture of containing sodium bicarbonate was observed between 568-778°C. Aluminum anodized waste can be used in fire retardant production as well as harmless for human health and environmentally friendly composite panels were obtained.

**Keywords:** Eloksal waste, caustic, chipboard, flame retarder, LOI.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada yıllık alüminyum üretimi 30 milyon tondur. Bu miktar, demir-çelik üretimi (858 milyon ton/yıl) ile kıyaslandığında çok düşük görülebilir. Ancak ton başına sağlanan yıllık katma değer açısından bakıldığında alüminyumun katma değeri demirden 6,8 kat daha

fazladır. Türkiye'de alüminyum metalinin inşaat sektöründe yoğun kullanımı ile Etibank Seydişehir Alüminyum tesisleri yerli üretim ihtiyacını karşılamada yetersiz kaldığından günümüzde hammadde açığı dış alımla karşılanmaktadır. Türkiye'de alüminyum ekstrüzyon profil üretimi 2015 yılında 250.000 ton olarak gerçekleşmiştir. Eloksal kaplama işlemi, önceden ön işlemlerden geçirilmiş olan alüminyum parça yüzeyinin elektrokimyasal yöntemle bir asit banyosunda doğru akım verilerek alüminyum oksit filmi oluşturulması ve

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



bu filmin sıcak su banyosunda tespitidir [1]. Bu film tabakasının kalınlığı isteğe bağlı olarak 2-2,5µm arasında olabilir. Profillerde ön yüzey temizliği ve matlaştırma için yağ alma, kostik banyoları ve yıkama banyoları gibi çok sayıda banyo kullanılması gerekmektedir [2, 3]. Binaların Yangından Korunması Yönetmeliği [4], Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği [5] ve Binalarda Isı Yalıtımı Yönetmeliği [6] uyarınca ısı enerjisinin korunması ile beraber insan sağlığı ve güvenliğinde göz önünde tutulması gerekmektedir. Halojenli alev geciktiriciler şimdiye kadar yaygın olarak kullanılmışsa da, yanma esnasında çıkardıkları toksik ve korozyif gazlardan dolayı giderek azalmakta; bunun yerini 'çevredostu' inorganik alev geciktiriciler almaktadır. İnorganik alev geciktiricilerin yanma olayına etkisi fizikseldir. Bu bileşikler dehidratasyon sıcaklıklarının üzerindeki sıcaklıklarda hidrasyon suyunu bırakarak bozunurlar. Gerçekleşen reaksiyon endotermik olduğundan ortamdan ısı alarak ortam sıcaklığının, polimerin yanma sıcaklığının altına düşmesine sebep olur. Bu sayede polimer malzemelerin dahayüksek sıcaklıklarda yangına karşı dayanıklılık göstermesi sağlanır. Organik bileşiklerin aksine, inorganik alev geciktiriciler ısı etkisiyle buharlaşmaz; bunun yerine H<sub>2</sub>O gibi zararsız, CO<sub>2</sub> gibi daha az zararlı gazlar açığa çıkararak bozunurlar. En çok kullanılan inorganik alev geciktiriciler magnezyum hidroksit, alüminyum trihidrat ve çinkoborattır [7-10]. Ayrıca alev geciktirici maddelerin malzemeye katılması malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine etki edeceğinden katılma oranları önemlidir, belirlenmesi gerekir [11].

Malzemenin yanma özelliklerinin belirlenmesinde çoğunlukla sınırlayıcı oksijen indeksi (limiting oxygen index, LOI) kullanılmaktadır. LOI, bir malzemenin yanması için ortam havasında hacimce bulunması gereken minimum oksijen yüzdesidir. LOI değerine göre alev geciktirici sınıflandırılması yapılmaktadır. Malzeme, LOI (%) düzeyi <24 ise alev alabilir, 24-28 sınırlı alev geciktirici, 29-34 alev geciktirici, >34 ekstra alev geciktirici sınıfında değerlendirilmektedir. LOI değeri yükseldikçe malzemenin yanıcılığı da düşmektedir. Alev geciktiricilerin LOI değeri yanında katıldığı malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine etkisi de hesaba katılmalıdır [12].

Bu çalışmada bol miktarlarda açığa çıkan alüminyum eloksal atıklarının kompozit panellerde belli oranlarda doğrudan kullanımıyla ekosisteme zarar vermeyen, enerji ve su tasarrufu sağlayan yangına dayanıklı malzeme üretimi amaçlandı.

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

Alüminyum eloksal atıklarından 150 gr örnek porselen havanda ezilerek ASTM 20 mesh numaralı (0,850 mm çapında) elekten geçirildi ve elek altı toz numune 70 oC sıcaklıkta 400 ml'de suda çözünen 40 g akrilik bağlayıcıya eklendi, reaksiyon için bir süre karıştırılarak bekletildi, süzülde ve 50 gramlık iki ayrı çökelek alındı.

Suyla yıkama yapmadan doğrudan kullanıldı. Akrilik bağlayıcı eşliğinde çinkoborat (Sigma-Aldrich katalog no. 10361-94-1, %45 ZnO-%36 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), kalsiyum karbonat (Merck katalog no. 471-34-1, CaCO<sub>3</sub>) ve sodyum bikarbonat (Merck katalog no.144-55-8, NaHCO<sub>3</sub>) gibi yangına dayanıklı bileşiklerin yanısıra atıklarda bulunan alüminyum trihidrat (Al(OH)<sub>3</sub>) ve alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ile karıştırıldı. Atıkların ve oluşturulan diğer karışımların yapı analizleri GNRAPD2000PRO Diffractometre ile Cu-Kα ışınlarında 1,46 A°da 40KV ve 30mA şartlarında çalışılarak yapıldı. TG- DTA termal analizleri NETZSCHSTA449F3JUPITER cihazında argon atmosferinde 150-2400°C aralığında 10°C/dakika ısıtma hızında çalışılarak yapıldı. Panellerde matriks olarak görünür yoğunluğu 0,565g/cm<sup>3</sup> olan suntalar kullanıldı. Aleve dayanım deneylerinden önce 1,7×9,8×15 cm'lik panellerden 1,7×1,7×9,8 cm'lik çubuk bloklar şerit testereyle kesildi, yüzeylerdeki ve kenarlardaki pürüzler zımparayla giderildi.

### 2.1. Deneme-1 (Experiment-1)

1.aşama: Akrilik bağlayıcı fırça ile homojen olarak sunta yüzeylerine sürüldü, 1 saat 50°C'de etüvde bekletildi. Yüzeylere sürülecek karışımı oluşturmak için ayrı olarak 70°C'lik suda bağlayıcıyla beraber eloksal atığı bir süre karıştırıldı, oda sıcaklığına geldikten sonra kaba süzgeç kağıdından süzülde. Elde edilen çökelekte sulu faz uzaklaştırıldı.

2.aşama: Elde edilen karışıma kütlece %1 oranında çinkoborat içeren su-bazlı ve hidroksi etil selülozlu iç cephe boyası (Çizelge 3) eklenerek karıştırıldı [13]. Oluşturulan karışım bir spatül ile sunta panel ve çubuklara 1-2 mm kalınlığında uygulandı. Üzerine tekrar bir kat bağlayıcı sürülerek 24 saat 50°C'de etüvde bekletildi.

**Çizelge 3.** Su bazlı iç cephe boya formülasyonu (Interior white paint formulation)

Kimyasal madde	%w/w	Kimyasal madde	%w/w
Su	20,0	Kalsit (5µm)	23,33
Kalgon	0,25	Hidroksietil selüloz	0,3
Amonyak	0,004	Zamk	16,66
Köpükkesici	0,3	Teksanol	1,0
Dispersiyon ajanı (P-90)	0,32	Akrisol	2,5
TiO <sub>2</sub>	10,0	Çinkoborat	1,0
Kalsit(2µm)	28,84		

### 2.2. Deneme-2 (Experiment-2)

Denemelerdeki 1. aşamadan elde edilen çökeleğe çinkoborat ve bağlayıcı ilave edilerek iyice karıştırıldı

ve sunta panellere uygulandı. Üzerine tekrar bir kat bağlayıcı sürülerek 24 saat 50°C'de etüvde bekletildi.

### 2.3. Deneme-3 (Experiment-3)

Deneme1'deki 1. aşamadan elde edilen çökeleğe çinko borat ve fiber glass lifleri ile Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yeşil pigmenti ilave edilerek iyice karıştırıldı ve sunta panellere uygulandı. Üzerine tekrar bir kat bağlayıcı sürülerek 24 saat 50°C'de etüvde bekletildi.

### 2.4. Deneme-4 (Experiment-4)

Deneme1'deki 1. aşamadan elde edilen çökeleğe ıslak atık miktarı kadar kalsiyum karbonat ve 0,1M HCl ilave edilerek karıştırıldı. Elde edilen karışıma %1 oranındaçinkoborat ilave edildi, bir spatula ile panel ve çubuklara 1-2 mm kalınlığında uygulandı. Üzerine tekrar bir kat bağlayıcı sürüldü. 24 saat 50°C'de etüvde bekletildi.

### 2.5. Deneme-5 (Experiment-5)

Deneme1'deki 1. aşamadan elde edilen çökeleğe ıslak atık miktarının iki katı CaCO<sub>3</sub> ile 0,1 M HCl ilave edilerek karıştırıldı. Burada CaCO<sub>3</sub> miktarının fazla olmasının sebebi NaHCO<sub>3</sub> kullanılmasındandır. Karbondioksit gazı çıkışıyla gözenekli ve daha yüksek miktarda karışım elde edildi. Elde edilen karışım bir spatül ile panel ve çubuklara 1-2 mm kalınlığında uygulandı, bağlayıcı uygulandıktan sonra 24 saat 50°C'de etüvde bekletildi.

Tüm numunelerin sıcak ve soğuk şartlara dayanım sonucunu görebilmek için 3 ay süreyle -18°C ve 50°C'de uç sıcaklıklarda bekletildi.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Oksijen ve azot akış hızlarındaki artış ve azalış miktarları aşağıdaki Eşitlik 1 ve 2'de verildiği şekilde interpolasyon ile bulundu: Bu hesaplamada başlangıç O<sub>2</sub> değeri %27 olarak belirlendi ve bu değere karşılık gelen O<sub>2</sub> akış hızı 67,5 ml/min, N<sub>2</sub> akış hızı 88 ml/min. 'dir[14]. O<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> akış hızları artış ve azalış miktarları için ASTM D 2863'de verilen hesaplama basamakları ve adım aralığının geçerliliği aşağıda verildi.

$$O_2 : \frac{67,5 - 65}{100} \times 0,2 = 0,5 \text{ artış} \quad (1)$$

$$N_2 : \frac{88 - 86,5}{100} \times 0,2 = 0,3 \text{ azalma} \quad (2)$$

Bulunan oksijen indeksinin doğrulanması için standart sapma hesabı yapıldı ve Eşitlik 6'da verilen adım aralığının geçerliliği tespit edildi.

$$\sigma = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (c_i - O, I)^2}{n - 1} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$0,315/5 = 0,063 \quad (4)$$

$$\sqrt{0,063} = 0,251 = \sigma \quad (5)$$

$$\frac{2\sigma}{3} < d < \frac{3\sigma}{2} \quad (6)$$

0,167 < d < 0,377 aralığında bulunan adım aralığının 0,2 olmasıyla diğer alevlenebilirlik testlerine devam edildi..Alev boyu, numunelerin tüm yüzeyini kaplayacak şekilde yapılan bir süpürme hareketi ile iki paralel numuneye uygulandı. Numunelerin alev almaya başlama anına kadar geçen süre kaydedildi. Bu esnada alev, oksijen ve azot gazlarının vanaları kapatıldı. Uygulanan Dixon metoduna [14] uyularak, standarda göre yanma süresi 180 saniyenin altında ise "O" tepkisi, 180 saniyenin üstünde ise "X" tepkisi vereceği belirlendi. %27'ye karşılık gelen oksijen değerinde başlatılan 1.denemede yanma süresi 480 saniye olduğu tespit edilince sonraki denemelerde doğrudan doğruya %34 ve %38'e karşılık gelen oksijen değerinde çalışılarak bu durum diğer denemelerde aynı şekilde devam ettirildi. Yapılan hesaplamalar ile oksijen ve azotun akış hızları hesaplandı ve deney bu değerlerle beraber tekrarlandı. Değerlerin standart sapması hesaplanarak sonuçların geçerliliği hesaplandı ve doğrulandı. Şekil 1'de LOİ testi öncesi ve LOİ testi anında test düzeneğinin durumu görülmektedir.

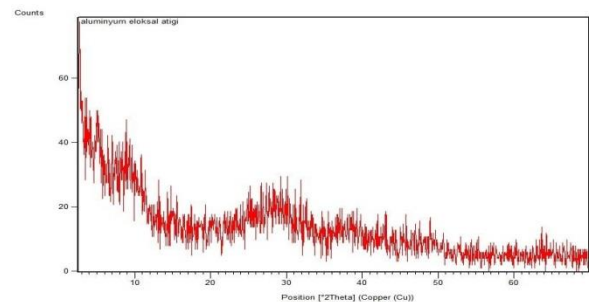


Şekil 1. LOİ Test Düzeneği (Dynisco LOI apparatus)

## 4. SONUÇLAR (RESULTS)

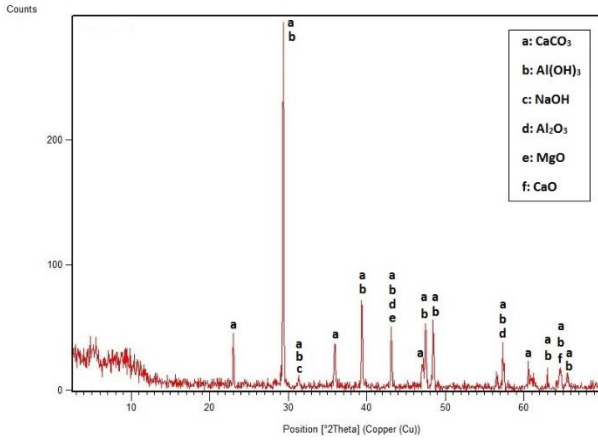
### 4.1. XRD Analizi (XRD Analysis)

Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'de ham alüminyum eloksal atıkları (%75 nem içerikli), kalsiyum karbonat içeren sodyum bikarbonatlı ve çinko boratlı içeren atığın XRD analiz sonuçları sırasıyla görülmektedir.



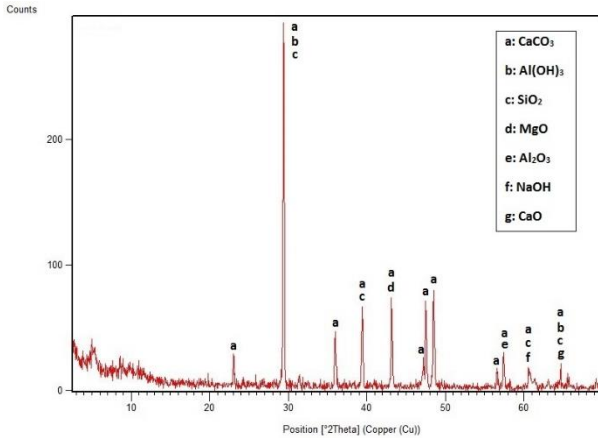
Şekil 2.Eloksal atığın XRD analizi (XRD analysis of the eloxal waste)

Şekil 2’de alüminyum eloksal atıklarında (%75 nem içerikli), yoğun olarak  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ile bu yapıya bağlı olarak kostik, alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SO}_3$  ve eser miktarda  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  bulunmaktadır.



**Şekil 3.** Sodyum bikarbonat içeren atığın XRD analizi (XRD analysis of the waste having sodium bicarbonate)

Şekil 3’te sodyum bikarbonat eklenmiş numunenin XRD sonucunda ise yoğun olarak  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ile beraber  $\text{NaOH}$  ile  $\text{CaCO}_3$  ve eser miktarda  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$  bulunduğu tespit edildi. XRD analiziyle gözlenemeyen reaksiyon ürünü gaz fazında  $\text{CO}_2$ ’dir.

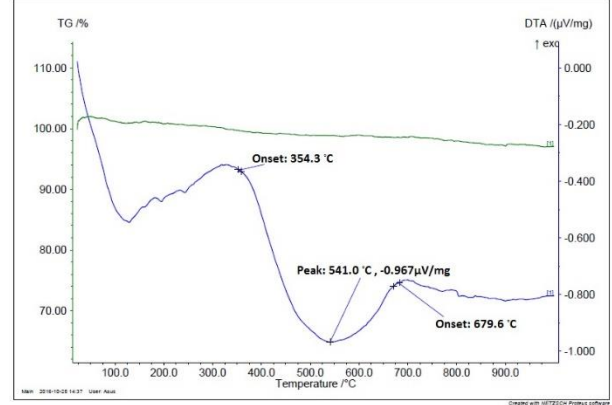


**Şekil 4.** Çinko borat içeren atığın XRD analizi (XRD analysis of the waste having zinc borate)

Şekil 4’de çinko borat eklenmiş numunenin XRD analizinde yoğun olarak  $\text{CaCO}_3$  pikleri ile eser miktarda  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  belirlendi. Çinko borat varlığının tespit edilememesinin sebebi ise kütlece %1 oranında, XRD analizörünün deteksiyon limitinin altında, kullanımıdır.  $\text{CO}_2$  gaz fazında bulunduğu XRD analizinde piki görülemedi.

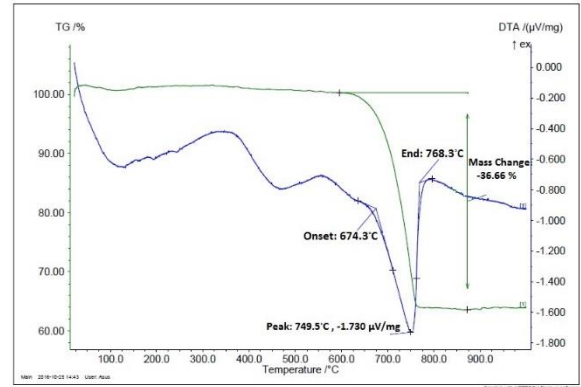
#### 4.2. Termal Analiz (Thermal Analysis)

Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7’de sırasıyla alüminyum eloksal atıkları (%75 nem içerikli), sodyum bikarbonat ve çinko borat içeren atığın TG-DTA termal analiz sonuçları görülmektedir.



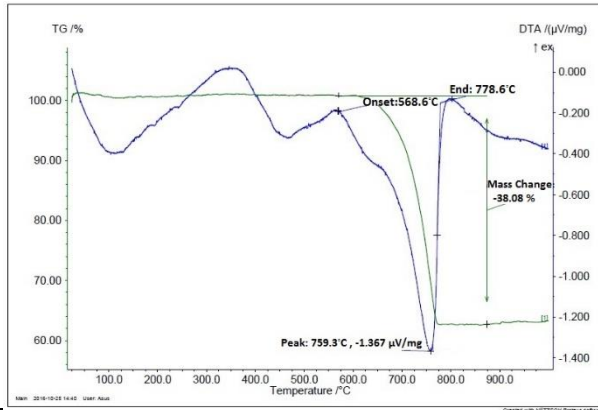
**Şekil 5.** Alüminyum eloksal atığında TG-DTA analizi (TG-DTA analysis in aluminum anodizing waste)

Şekil 5’de alüminyum eloksal atığının TG-DTA analizinde, görünür madde kaybı olmadığı; 354,3 – 679,6°C sıcaklık aralığında belirgin yayvan pikin yapıdaki suyun buharlaşmasından kaynaklandığı ve yapıdaki  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ve kostiğin bazik yapısı sebebiyle ekzotermik geçiş sıcaklıkları olduğu tespit edildi.



**Şekil 6.** Sodyum bikarbonat içeren atığın TG-DTA analizi (TG-DTA analysis of the waste having sodium bicarbonate)

Şekil 6’da sodyum bikarbonat içeren atığın TG-DTA analizinde görünür madde kaybının %36,66 olduğu; bozunma sıcaklığının 674,3 – 768,3 °C aralığında ve maksimum bozunmanın 749,5 °C sıcaklıkta olduğu belirlendi. Bu yüksek bozunma sıcaklığının  $\text{CO}_2$  (450°C);  $\text{CaO}$  (>750°C) ve  $\text{CaCO}_3$  (>600°C) yapılarındaki belirtilen sıcaklıklardaki termal bozunmalardan kaynaklandığı tespit edildi.



**Şekil 7.** Çinko borat içeren atığın TG-DTA analizi (TG-DTA analysis of the waste having zinc borate)

Şekil 7’de çinko boratlı atığın TG-DTA analizinde bozunma sıcaklığının 568,6 – 778,6 °C aralığında olduğu; maksimum bozunma sıcaklığının 759,3 °C olarak çinko borat bozunması kaynaklı olduğu ve kütle kaybının en fazla bu karışımda %38,08 olduğu belirlendi. Bu kütle değişimlerinin sebebi olarak maddelerin bozunma sıcaklıklarında parçalanması ve meydana gelen farklı reaksiyonlardan ileri geldiği söylenebilir. Ayrıca eloksal atığının ve üretilen kompozit karışımların bozunma sıcaklıklarının yüksek olması nedeniyle alev geciktirici olarak kullanılabilirliği belirlendi.

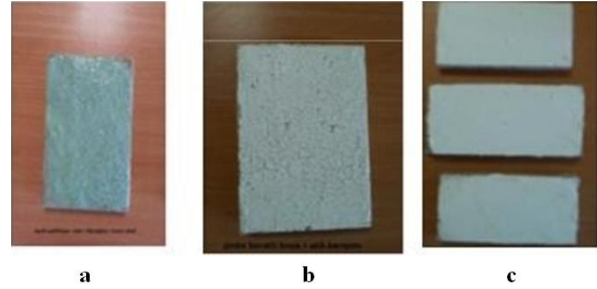
#### 4.3. LOİ Sonuçları (LOI Results)

LOİ uygulamalarındaki tüm örneklerde, %27 oksijen konsantrasyonunda yanma süreleri 480 saniye değerinde elde edildiğinden bir sonraki adımda %34, %38 ve zorlayıcı şart olan %40 değerine kadar çıkılarak oksijen ve azotun akış hızları Çizelge 4’te görüldüğü şekilde hesaplandı.

**Çizelge 4.** Oksijen konsantrasyonu tayini (Determination of oxygen concentration)

O <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> akış hızı (ml/min)	N <sub>2</sub> akış hızı (ml/min)	Yanma Süresi (s)	Hareket
27	67,5	86,5	Tutuşmadı	O
34	84,5	78	Tutuşmadı	O
35	86	77	Tutuşmadı	O
37	89	75	Tutuşmadı	O
38	90,5	74	240	X
40	94	72	180	X

Çizelge 4’ten görüldüğü gibi çinko boratlı ve boya içeren numune için oksijen yüzdesi %38 değerine karşılık gelmektedir. Şartların daha zorlayıcı olabilmesi için %40’lık oksijen yüzdesinde çalışıldı ve 180 saniye aleve dayandığı tespit edildi. Şekil 8’de denemelerde alev testi öncesi ve blok halinde kesilmeden önce kaplaması yapılan sunta panel görüntüleri LOİ testi öncesi ve sonrasına ait olmak üzere deneme sırasına uygun olarak görülmektedir.



**Şekil 8.** Elde edilen sunta paneller (a. Deneme 1, b. Deneme 2, c. Deneme 3, 4, 5) (Obtained chipboard panels, (a. Experiment 1, b. Experiment 2, c. Experiment 3, 4, 5))



**Şekil 8.** LOİ testi öncesi ve sonrası (Before and after of LOI test)

LOİ Testi sonuçları tüm denemelerin bitiminden sonra Çizelge 5’te verildiği şekilde hesaplandı. %38 O<sub>2</sub> yoğunluğu için, O<sub>2</sub> akış hızı 90,5 ml/min, N<sub>2</sub> akış hızı 72 ml/min şartları aynı tutularak denemelerde elde edilen kompozitlerde ulaşılan alev geciktirme süreleri Çizelge 5’te görülmektedir. Kaplama yapılmamış ham sunta panellerde tespit edilen O<sub>2</sub> yoğunluğu ise %23 olup bu değere karşılık gelen O<sub>2</sub> akış hızı 65 ml/min, N<sub>2</sub> akış hızı 86,5 ml/min değerindedir. Görüldüğü gibi ham sunta paneller alev alabilir sınıfında yer almaktadır [12].

**Çizelge 5.** Tespit edilen alev geciktirme süreleri (The obtained flame retarder times)

Deneme	Süre (s)
Deneme 1	180
Deneme 2	220
Deneme 3	180
Deneme 4	180
Deneme 5	250

1, 2 ve 3 no.lu denemelerde elde edilen LOİ sonuçları ekstra alev geciktirici özellikte bulundu. Boyanın kullanıldığı numunede bir miktar yüzey çatlaması olduğu tespit edildi. Sebep olarak inşaat boya depolama kararlılığının en fazla 45°C’de yapılması dolayısıyla daha sıcak 70°C’deki kurutma sonucu çatlama olduğu düşünülebilir. Deneme 2 ve 3’de bu durum gözlenmemesine ve ekstra alev geciktirici bulunmasına rağmen boya, epoksi ve fiber glass yapılarının yanma reaksiyonları sonucunda yapılarındaki olefinik grupların oksidasyonu ile peroksit tipi radikaller oluşturabileceği sebebiyle önerilmemektedir. Ancak bu tür yapıların bulunmadığı kalsiyum karbonat ve sodyum bikarbonatlı karışımlarda bu tehlike olmadığı gibi daha ekonomiktir, aynı zamanda ürün verimi daha yüksektir. Deneme 4’te oluşan reaksiyon aşağıdaki şekildedir:



Bu reaksiyon sonucu karbondioksit gazı çıkışıyla gözenekli ve hava boşluklu ürün elde edildi. Elde edilen bu ürünler blok halinde preslenerek aynı zamanda ytong (gaz beton) türü yapılarda rahatlıkla kullanılabilir. Sodyum bikarbonatlı karışımda ürün verimi artışı yanı sıra 250 saniye süreyle alev geciktirme elde edildi. Ayrıca elde edilen kaplaması yapılmış sunta paneller 3 ay süreyle -18°C ve 50°C’de uç sıcaklıklarda bekletildi ve fiziksel görünümünde bir değişiklik gözlenmedi.

Bu çalışmada elde ettiğimiz sonuçlara göre, alüminyum eloksal atıklarına herhangi bir ön işlem uygulanmasına gerek kalmadan (yıkamayla kostik giderimi, ilave kurutma ve su kullanımı giderleri olmaksızın) sunta türü malzemelerde kullanılacak ekstra alev geciktirici özellik kazandırılmıştır. Elde edilen kompozit yapılar ile “Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik” gereğince, insan ve çevre sağlığına duyarlı, binalarda iç ve dış cephelerde taşıyıcı olmayan duvar bölmelerinde kullanılacak ekonomik paneller elde edildi. Suntainın alev dayanımı çok düşük olduğundan (bu çalışmada %23 O<sub>2</sub> olarak tespit edildi) elde edilen bulgular suntalarda alev geciktirme sağlayabilir. Aynı zamanda oldukça fazla yer işgal eden ve bu atıklar sebebiyle zorluk yaşayan üretici firmaların atıkları uygun biçimde değerlendirilmiş, dolayısıyla insan sağlığı ve çevre sağlığı korunmuştur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Günay, D. “Alüminyum Sektörü Hakkında Bir Değerlendirme”, *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Müdürlüğü*, GA-06-07-08, Ankara, (Eylül 2006).

- [2] “Alüminyum Yüzey İşlemleriyle İlgili Genel Tanıtıcı Bilgiler”, *AYİD* / İstanbul, (2000).
- [3] Uluca, T., “Alüminyum Ürün Çeşitleri, Kullanımları Geri Kazanılması”, *Alüminyum ve Çevre*, İstatiksel Bilgiler, İstanbul, (2000).
- [4] “Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik”, *Resmi Gazete*, 9 Eylül 2009-sayı 27344.
- [5] “Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği”, *Resmi Gazete*, 5 Aralık 2008- sayı 27075.
- [6] “Binalarda Isı Yalıtımı Yönetmeliği”, *Resmi Gazete*, 9 Ekim 2008- sayı 27019.
- [7] Zhang, Y. Y., Xue, L., and Liu, Z. H., “Preparation of cluster-like nanostructure and nanoribbon for 4ZnO·B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O and the evaluation of their flame retardant properties by a thermal analysis method”, *Thermochimica Acta*, 506(1): 52-56, (2010).
- [8] Laoutid, F., Bonnaud, L., Alexandre, M., Lopez-Cuesta, J. M., and Dubois, P., “New prospects in flame retardant polymer materials: from fundamentals to nanocomposites”, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 63(3): 100-125, (2009).
- [9] Formicola, C., De Fenzo, A., Zarrelli, M., Frache, A., Giordano, M., and Camino, G., “Synergistic effects of zinc borate and aluminiumtrihydroxide on flammability behaviour of aerospace epoxy system”, *Express Polymer Letters*, 3(6): 376-384, (2009).
- [10] Ramazani, S. A., Rahimi, A., Frounchi, M., and Radman, S., “Investigation of flame retardancy and physical-mechanical properties of zinc borate and aluminum hydroxide propylene composites”, *Materials & Design*, 29(5): 1051-1056, (2008).
- [11] Sidebotham, G. W., Cross, J. A., and Wolf, G. L., “A Test Method for Measuring the Minimum Oxygen Concentration to Support an Intraluminal Flame”, *In Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Sixth Volume*, ASTM International, (1993).
- [12] Schmidt, R., “In the line of fire, flame retardants overview”, *Industrial Minerals*, 37-41, (1999).
- [13] Murathan, H.B., Murathan, A., “Low cost flame retarder in interior wall paints” *Paint İstanbul, Turkcoat*, İstanbul Kongre Merkezi, 23-26 Mart 2016.
- [14] ASTM D 2863, Standard Test Method for Measuring the Minimum Oxygen Concentration to Support Candle-Like Combustion of Plastics (Oxygen Index), 2009.



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

## Çapraz akışlı hava-gaz ısı değiştiricisinin sonlu farklar metodu kullanılarak modellenmesi

### *Modeling of cross flow air-gas heat exchanger using finite difference method*

Yazar(lar) (Author(s)): Halil ATALAY<sup>1</sup>, Mustafa Turhan ÇOBAN<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-4549-584X

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-1178-3023

**Bu makaleye řu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article):** Atalay H. ve oban M. T. , “Çapraz akışlı hava-gaz ısı değiştiricisinin sonlu farklar metodu kullanılarak modellenmesi ”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 155-163, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.389585

# Çapraz Akışlı Hava-Gaz Isı Değiştiricisinin Sonlu Farklar Metodu Kullanılarak Modellenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Halil ATALAY<sup>1\*</sup>, M. Turhan ÇOBAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yozgat Bozok Üniversitesi, Türkiye

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

(Geliş/Received : 24.01.2017 ; Kabul/Accepted : 08.05.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada çapraz (dik) akışlı ısı değiştiricileri üzerindeki sıcaklık dağılımı ve ısı transferi hesapları iki boyutlu sonlu farklar modeli kullanılarak yapılmıştır. Çapraz akışlı ısı değiştiricileri birbirine paralel levhalardan oluşur ve bir levhadan sıcak akışkan akarken bir sonraki levhadan soğuk akışkan çapraz geometride akar. Bu yapı birçok levha halinde tekrarlanır. Diferansiyel denklem sonlu farklar denklemleri haline getirildikten sonra iki giriş sıcaklığının bulunduğu köşeden başlamak suretiyle satırlar halinde çözümlenir ve bu şekilde tüm ısı değiştiricinin sıcaklık profiline kolaylıkla ulaşılır. Bu çalışma boyunca soğuk akışkan olarak tüm analizlerde hava alınmıştır. Sıcak akışkan olarak ise hava ve yanma gazları alınarak ısı değiştiricinin performansı incelenmiştir. Bu çalışma için sonlu fark denklemleri kullanılarak Java programlama dilinde bir matematiksel model geliştirilmiştir. Örnek olarak 75°C giriş sıcaklığına sahip sıcak akışkan ile 20°C giriş sıcaklığına sahip soğuk akışkanın sıcaklık profili geliştirilen matematiksel model yardımı ile adım adım hesaplanmış ve toplam ısı transfer değeri de yaklaşık 45,5 KW olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Isı transferi, sonlu farklar metodu, sıcaklık dağılımı, dik (çapraz) akışlı ısı değiştiricisi.

## Modeling of Cross Flow Air-Gas Heat Exchanger Using Finite Difference Method

### ABSTRACT

In this study, temperature distribution and total heat transfer were calculated for two-dimensional cross flow heat exchanger using finite difference method. A cross-flow heat exchanger consists of parallel sheets. While the hot fluid flows from one plate, the cold fluid flows through the next plate with cross geometry. This structure is repeated in many plates. After the differential equation is converted to the finite difference equation, it proceeds in a row by starting from the corner where the two inlet temperatures are known, and thus the temperature profile of the entire heat exchanger is easily reached. Throughout the study, air was used as cold fluid in all analysis. Air and exhaust gases were taken as hot fluid, thus the performance of the heat exchanger was examined. A mathematical model was developed by using the finite difference equations in Java programming language. For example, the temperature profile of a hot air with an inlet temperature of 75 C and the temperature profile of a cold air with an inlet temperature of 20 C were calculated with the aid of the mathematical model and the total heat transfer was determined approximately 45,5 KW.

**Keywords:** Heat transfer, finite difference method, distribution of temperature, cross flow heat exchanger

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde enerjinin verimli bir şekilde kullanılması zorunlu hale gelmektedir. Bu nedenle enerjinin tüketildiği her noktada enerji kayıplarını minimum seviyeye çekmek gerekmektedir. Kaybedilen ısı miktarı belirli sınırlar içerisinde tutulabilse bile gerek endüstriyel uygulamalarda gerekse iklimlendirme uygulamalarında belirli bir ısı yüküne sahip akışkanın dış ortama atılması mecburiyeti söz konusu olmaktadır. Atık ısı olarak adlandırılan bu kayıp ısı miktarı toplam enerji tüketimi içerisinde önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle kayıp enerji miktarının, dolayısıyla işletme giderlerinin azaltılması amacıyla atık ısının meydana geldiği sistemlerde, enerji geri kazanım sistemlerinin tasarlanması ve uygulanması gerekmektedir. Özellikle bu amaç doğrultusunda kullanılan çapraz akışlı

gaz-gaz ısı değiştiriciler binalarda, klima sistemlerinde, kazan bacalarında ısının geri kazanılması için oldukça önemli bir potansiyele sahiptirler. Bu tip sistemlerde herhangi bir işlem sonucunda belirli bir ısı ve nem seviyesine geldikten sonra dışarıya atılmak zorunda kalan sıcak gaz (hava vb.) ile dış ortamdan alınan soğuk gazın (hava vb.) karışmadan birbirlerine göre çapraz geometri ile akması sonucu gerçekleştirdikleri ısı transferi sayesinde atık ısının önemli bir kısmının geri kazanılması sağlanır. Paralel levhalardan oluşan bu tip sistemlerde çapraz akıştan dolayı ısı değiştiricideki sıcaklık profilleri her iki akışkan için de iki boyutlu olarak değişir.

Literatürde çapraz akışlı ısı değiştiricilerin ısı transferi prosesleri üzerindeki çeşitli parametrelerin etkilerine yönelik teorik ve deneysel olarak önemli sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazılarını şu şekilde özetlemek mümkündür: Cadavid ve ark.[2] kompakt ısı geri kazanım ünitelerini tasarlamak ve boyutlandırmak

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : halil.atalay@bozok.edu.tr

için alüminyumdan imal edilen bir ısı geri kazanım ünitesinin ısı performansını hesaplamak adına gerekli enerji denklemlerini ayrıştırarak bir hesaplama algoritması geliştirmişlerdir. Hajabdollahi ve ark. [8] hem soğuk hem de sıcak taraflardaki akış dağılımının etkilerini göz önüne alarak, çapraz akışlı bir ısı değiştiriciyi çok amaçlı optimizasyon algoritmasına bağlı olarak optimize etmişlerdir. Optimizasyonu doğrusal, parabolik ve güç yasası dahil olmak üzere üç tekdüze olmayan hız girişi profilleri için gerçekleştirmişler ve optimum sonuçları uniform profil ile karşılaştırmışlardır. Liu ve ark.[10] düz plakalı ısı değiştiricilerinde donma olayındaki giriş koşullarını tahmin etmek için basitleştirilmiş bir teorik model geliştirilmişlerdir. Modelde, donma limitini belirlemek için ısı değiştirici tasarım parametrelerini ve çalışma koşullarını kullanmışlar, soğutma limitleri modelini doğrulamak için deneysel testler yapmışlar ve sonuçların uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Navarro ve ark. [11]  $\epsilon$ -NTU ilişkisini belirlemek adına karmaşık akış düzenlemelerine sahip çapraz akışlı ısı değiştiricileri için bir matematiksel model önermişlerdir. Geliştirilen bu model boru tipi yaklaşımı temel olarak hazırlanmış olup buna göre de ısı değiştiricinin çıkış sıcaklıklarını boru akışı boyunca serpantinlerin ayrıştırılması yoluyla elde etmişlerdir. Oğulata ve ark.[12] dengeli çapraz akışla analiz edilen, karıştırılmamış akışkanlar ile çalışan çapraz akışlı plaka tipi bir ısı değiştirici geliştirmişlerdir. Bu ısı değiştiricinin geçerliliğini belirlemek amacıyla da uygulanabilir bir deneysel düzenek kurarak ısı değiştiriciyi test etmişler ve sıcaklık, hava hızı ve sistemde meydana gelen basınç kayıplarını belirlemişlerdir. Rogiers ve ark.[13] 2.5 KW'lık mikro gaz türbininde kullanmak üzere geliştirdikleri bir ısı değiştirici ünitesinin optimizasyon çalışmasını sunmuşlardır. Bu çalışmadaki zorluğun, sistemin entegrasyonundaki geometrik kısıtlamalar ve üretim sınırları göz önüne alınarak, yüksek etkinliğe sahip bir ısı değiştiricinin kanallardaki düşük basınç düşümü ile birleşimini sağlayacak bir tasarım bulmak olduğunu ifade etmişlerdir. Dolayısıyla bu çalışmada duvarlarda aksel ısı iletimi oluşturan ısı transferi modeli ile birlikte ters bir basınç düşümü modeli kullanmışlardır. Bu ısı değiştiriciyi daha sonra bir gaz türbinine entegre etmişlerdir. Burada iki farklı ısı değiştirici dizayn konfigürasyonu düşünülmüştür. En uygun ısı değiştirici konfigürasyonunu belirlemek için maliyet fonksiyonu olarak çevrim verimini kullanmışlar ve bir optimizasyon uygulamışlardır. Sonuç olarak ısı değiştirici üzerinde iki konfigürasyon arasındaki seçimin dış boyut kısıtlamalarına bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Quadir ve ark.[14] üçlü eşmerkezli boru ısı eşanjörünün performansını, farklı akış düzenlerinde ısı eşanjörünün yalıtılmış ve izolasyonsuz koşulları için kararlı durum koşulları altında sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sayısal olarak gerçekleştirmişlerdir. Üç sıvı olarak sıcak su, soğuk su ve normal musluk suyunu kullanmışlardır. Farklı akış hızları için ısı eşanjörü uzunluğu boyunca üç akışkanın boyutsuz sıcaklık değişimlerini sunmuşlardır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak üç akışkanın sıcaklık değişimlerinin sayısal öngörülerini, ısı transfer katsayılarının sağlanması koşuluyla, büyüklük

ve eğilim açısından deneylerden elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğunu saptamışlardır. Saha ve ark.[15] dikdörtgen mikro kanallı karşıt akışlı ısı eşanjörlerinin tasarımı için bir yöntem sunmuşlardır. Kabul edilen metodolojiyi iki modele dayandırmışlar ve bunları tek boyutlu bir model ve CFD modeli olarak adlandırmışlardır. Bu amaçla hidrodinamik ve termal olarak eşdeğer bir paralel plakalı ısı değiştirici kullanmışlardır. Starace ve ark. [16] çapraz akışlı kompakt ısı eşanjörlerini  $\epsilon$ -NTU ve LMTD yöntemleriyle modellemişler ve mikro ölçekte ısı transferi geometrisi üzerinde etkili bir değerlendirme yapmaya çalışmışlardır. Aynı zamanda, sıcak ve soğuk taraflarda farklı ve karmaşık kanatlı yüzeylere sahip kompakt çapraz akışlı ısı değiştiricilerinde analitik yaklaşımlardan yararlanarak güçlü bir alternatif tasarım geliştirmişlerdir. Taler ve ark.[17] karmaşık akış düzenine sahip çapraz akışlı ısı değiştiricileri için buhar sıcaklıkları ve baca gazı üzerindeki kirlilik faktörünün etkisini belirlemek amacıyla sayısal bir model geliştirmişlerdir. Vafajoo ve ark. [18] rafineri baca gazlarından enerji elde etmek ve bir yanma odası giriş havasını ön ısıtma yapmak için reküperatif ısı eşanjörünün matematiksel bir modelini geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu modeli plaka eşanjör ile karşılaştırdıklarında basınç düşüşünde% 63'lük bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Vaiteknas[19] hareketli proses simülasyonuna uygun, çapraz akışlı ısı değiştiriciler için genel bir model sunmuştur. Bu çalışmada birleştirilmiş akış ile sıcaklık ve basınç düşümündeki keyfi geçişler için enerji çözümlerinin formüllerini oluşturmak amacıyla sonlu fark modelini kullanmıştır. Vali ve ark.[20] her biri paralel levhalar veya membranlar arasında ters ve çapraz akışın birleşimi olan iki ısı değiştiricisi ile çevresel bir ısı geri kazanım sisteminde ısı transferini çalışmak için kararlı halde iki boyutlu sayısal bir model geliştirmişlerdir. Ayrıca, kararlı hal denklemlerinin sürekliliği, momentum ve ısı transferini çözmek için de sonlu farklar metodunu kullanmışlardır. Yang ve ark.[22] dört farklı modelleme yaklaşımı ile borulu ısı eşanjörünün 3-D sayısal simülasyonunu geliştirmişler ve deney sonuçları ile doğrulamışlardır. Dört farklı modelleme yönteminde eşanjörü gözenekli bir ortam olarak kabul etmişler ve CFD ile tüm eşanjörü modellemişlerdir. Sonuçları incelediklerinde periyodik modelin, gözenekli modelin ve bütün modelin ısı transferini tahmin etmede yüksek doğruluk gösterdiğini ve birim modelin ise nispeten daha düşük bir doğruluk gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

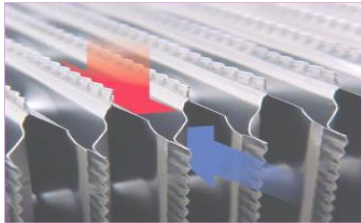
Bu çalışmanın amacı ve literatürde yapılan çalışmalardan farkı, özellikle uygulama alanlarında, iki boyutlu plaka tipi ısı değiştiricilerin tasarım ve performans analizini hızlı, kolay ve etkin bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktır. Bu amaç doğrultusunda sıcak hava veya sıcak yanma gazları kullanarak havayı ısıtan bir çapraz akışlı levha tipi ısı değiştiricinin iki boyutlu sıcaklık profili ve ısı transferi değişimi sonlu fark modeli oluşturularak irdelenmiş ve Java programlama dili kullanılarak da bir matematiksel modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen bu model sayesinde iki boyutlu çapraz akışlı



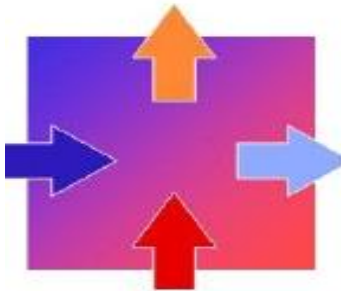
ısı değıştircisinin hem sıcak akışkan hem de soğuk akışkana ait sıcaklık dağılımları adım adım belirlenmiş ve meydana gelen ısı transfer değeri kolaylıkla hesaplanmıştır. Ayrıca bu model için kullanılan sıcak ve soğuk akışkanın termodinamik ve termofiziksel özellikleri(viskozite, ısı iletkenlik katsayısı vb.) gerçek gaz hal denklemleri ve eğri uydurulmuş veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Model üzerinde yapılan örnek çalışma literatürde yapılan çalışmalar ile kıyaslandığında bu tip ısı değıştircilerinin kullanım alanlarına göre tasarım ve boyutlandırma aşamasında çok küçük hata oranları ile optimum sonuç vermesi özellikle ısı değıştircilerin seçimi açısından önemli kolaylıklar sağlayacağını göstermektedir. Böylelikle herhangi bir endüstriyel sistemde kullanılacak olan iki boyutlu çapraz akışlı bir ısı değıştircisinin çalışma şartları (sıcak ve soğuk akışkan giriş sıcaklıkları, debileri, hızları vb.) belirlenerek geliştirilen bu matematiksel model sayesinde tasarımı ve boyutlandırılması daha hassas bir şekilde ve kolaylıkla yapılabilmektedir.

## 2. ÇAPRAZ AKIŞLI HAVA-GAZ ISI DEĞİŞTİRİCİNİN ISIL ANALİZİ(THERMAL ANALYSIS OF CROSS FLOW AIR-GAS HEAT EXCHANGER):

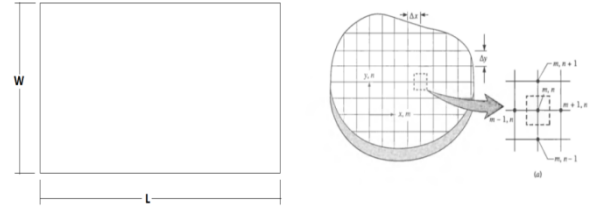
Bu bölümde çapraz akışlı hava-gaz ısı değıştircisinin ısı analizi üzerinde durulacaktır. Şekil 1 ve şekil 2'de çapraz(dik) akışlı bir ısı değıştircisi kesiti görülmektedir. Bu kesitlerde görüldüğü üzere sistemde yer alan iç hava aşağıdan girmekte yukarıdan çıkmaktadır(veya yukarıdan girmekte aşağıdan çıkmaktadır). Taze hava ise sol taraftan girmekte, sağ taraftan çıkmaktadır.



Şekil 1. Çapraz akışlı ısı değıştircisi üzerindeki sıcaklık dağılımının şematik gösterimi(Schematic representation of the temperature distribution over the crossflow heat exchanger)



Şekil 2.Çapraz akışlı ısı değıştircisi üzerindeki genel sıcaklık dağılım konfigürasyonu(Overall temperature distribution configuration on the cross flow heat exchanger)



Şekil 3. Çapraz akışlı ısı değıştircisi plaka kesitinde sonlu fark gösterimi(Finite difference model for cross-flow heat exchanger plate)

Sayısal olarak sıcaklık dağılımının bulunması, şekil 3'te de gösterildiği gibi sıcaklıkları belli olmayan her düğüm noktasında uygun denge eşitliğinin yazılmasını gerektirmektedir. Bulunan eşitlik takımı, her noktadaki sıcaklık için birbirlerine bağlı olarak çözülebilir. Bu çözümü sağlamak için ısı değıştircisi plakaları yüzeyinden geçen ısı transfer miktarının hesaplanması gerekmektedir. Temel ısı transfer bağıntısını yazıldığında[3,9];

$$Q_{m,n} = U_{m,n} * \Delta A_{m,n} * (T_{hm,n} - T_{cm,n}) \quad (1)$$

Her bir plaka yüzeyinden geçen ısı miktarı ise;

$$dQ_{m,n} = U_{m,n} * dA_{m,n} * (T_{hm,n} - T_{cm,n}) \quad (2)$$

bağıntısı ile verilmektedir.

Bu denklemlerde plakaların x yönünde m eleman sayısına, y yönünde ise n eleman sayısına sahip olduğu ve Problemin çözüm kolaylığı açısından  $\Delta x = \Delta y$  olduğu kabul edilmiştir.

$$x = m * \Delta x \quad (3.a)$$

$$y = n * \Delta x \quad (3.b)$$

Bu problem için sınır koşulları:

$$T_{hm,n} = T_{y0} = \text{Sabit} \quad (4.a)$$

$$T_{cm,n} = T_{x0} = \text{Sabit} \quad (4.b)$$

Isı değıştircide hem sıcak gaz hem de soğuk gazın giriş sıcaklıklarının biliniyor olması ve sabit olması gerekmektedir. Ayrıca gazların toplam debilerinin veya ısı değıştircisine giriş hızlarının da biliniyor olması gerekmektedir. Isı değıştircinin toplam levha sayısı ve levhalar arası mesafenin,  $\Delta z$ , de tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada akış alanı olarak sadece  $\Delta z$  mesafesinin yarısı göz önüne alınacak ve sınır değeri olarak adyabatik sınır değeri olarak varsayılacaktır. Bu yaklaşım sıcaklık profilinin z doğrultusunda değışmediğini varsaymaktadır. Kanallardaki gazın kütleli debisi:

$$\Delta m_{hm,n} = \frac{1}{2} \frac{m_h}{L} \quad (5)$$

$$\Delta m_{cm,n} = \frac{1}{2} \frac{m_c}{L} \quad (6)$$

Soğuk ve sıcak akışkan tarafındaki levha eşittir. Bu tarz ısı değiştiricileri uygulamalarında sıcak akışkan ve soğuk akışkan taraflarının boyu da birbirine eşit olmaktadır. Fakat bu durumun bu şekilde olması da zorunlu değildir. Bu çalışmada da boyların eşit olduğu varsayılmamıştır. Geliştirilen bu modelde hız profilinin dolayısıyla yerel kütleli debilerin de sabit olması gerekmektedir. Eğer değişken hız profili mevcutsa hız profili ve kütleli debi arasındaki ilişki:

$$\Delta m_{hm,n} = \rho_h (T_{hm,n}) \frac{\Delta z}{2} \Delta x V_{hm,n} \quad (7)$$

$$\Delta m_{cm,n} = \rho_c (T_{cm,n}) \frac{\Delta z}{2} \Delta x V_{cm,n} \quad (8)$$

Isı transferi için aynı zamanda termodinamiğin 1. kanunundan (enerji denklemi):

Sıcak akışkan için:

$$\Delta Q_{m,n} = Q_{hinput} - Q_{houtput} = \Delta m_{hm,n} (h_{hinput,m,n} - h_{houtput,m,n}) \quad (9)$$

$$\Delta Q_{m,n} = \Delta m_{hm,n} C_{p_h} (T_{hm,n}) (T_{h(m+1),n} - T_{hm,n}) \quad (10)$$

Soğuk akışkan için:

$$\Delta Q_{m,n} = Q_{cinput} - Q_{coutput} = \Delta m_{cm,n} (H_{cinput,m,n} - H_{coutput,m,n}) \quad (11)$$

$$\Delta Q_{m,n} = \Delta m_{cm,n} C_{p_c} (T_{cm,n}) (T_{cm,(n+1)} - T_{cm,n}) \quad (12)$$

Enerji denkleminde ısı transferi biliniyorsa bir sonraki sonlu elemanın sıcaklık değerleri elde edilebilir. Bu ısı değiştiricide iki taraftaki akış için dikdörtgen profil ısı transferi denklemleri kullanılabilir. Dikdörtgen kanal içindeki sıvı akışı için ısı transferi akış rejimine göre değişir. Akış rejimini bulmak için önce Reynold sayısı bilinmelidir. Reynold sayısı eşitlik 13 ile hesaplanır:

$$Re_D = \frac{\rho V D_H}{\mu} \quad (13)$$

Bu denklemden hidrolik çap değeri  $D_H$  aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir:

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (14)$$

Laminer akış şartlarında ( $Re_D < 2100$ ):

$$x = \frac{\Delta z}{W} \quad (15)$$

$$Nu_D = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + a_5 x^5 + a_6 x^6 \quad (16)$$

**Çizelge 1.** Eşitlik 16 için  $a_i$  katsayıları ( $a_i$  coeff. for eq.16)

$a_0$	0,75400000000580E+01
$a_1$	-0,193789080028494E+02
$a_2$	0,333861212302836E+02
$a_3$	-0,170496495070800E+02
$a_4$	-0,304226226912837E+02
$a_5$	0,495297442580787E+02
$a_6$	-0,206246852871550E+02

Geçiş bölgesinde ( $2100 < Re < 3300$ ) ise Abraham, Sparrow Tong [1] denklemini kullanabiliriz.

$$Nu_D = 2,2407 \left( \frac{Re_D}{1000} \right)^4 - 29,499 \left( \frac{Re_D}{1000} \right)^3 + 142,32 \left( \frac{Re_D}{1000} \right)^2 - 292,51 \left( \frac{Re_D}{1000} \right) + 219,88 \quad (17)$$

Türbülanslı bölgede ( $Re > 3300$ ) Gnielinski [6] denklemini kullanılabilir:

$$Nu_D = \frac{h D_H}{k} = \frac{(f/8)(Re_D - 1000) Pr}{1 + 12,7(f/8)(Pr^{2/3} - 1)} \quad (18)$$

Bu çalışmada sürtünme faktörünün hesaplanması için "Goudar-Sonnad Eşitliği" kullanılmıştır. [7]

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = a^* \left[ \ln \left( \frac{d}{q} \right) + D_{CFA} \right] \quad (19)$$

Bu eşitlikte;

$$a = \frac{2.0}{\ln(10)} \quad (20)$$

$$d = \frac{\ln(10) * Re}{5.02} \quad (21)$$

$$q = s^{s/s+1} \quad (22)$$

$$s = b * d + \ln(d) \quad (23)$$

$$b = \frac{\varepsilon/D}{3.7} \quad (24)$$

$$D_{CFA} = D_{LA} * \left( 1 + \frac{z/2}{(g+1)^2 + (z/3)^*(2g-1)} \right) \quad (25)$$

$$D_{LA} = z * \frac{g}{g+1} \quad (26)$$

$$g = b * d + \ln\left(\frac{d}{q}\right) \quad (27)$$

$$z = \frac{\ln(q)}{g} \quad (28)$$

Geliştirilen bu modelde sıcak akışkan ve soğuk akışkan aynı dikdörtgen kanaldan aktığı için toplam ısı transfer katsayısını hesaplamada aynı eşitlikten yararlanılabilir. Bu eşitlik:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_h} + \frac{s}{k_t} + R_h + R_c \quad (29)$$

Bir bilgisayar modeli oluşturabilmek için ek olarak suyun ve havanın termodinamik ve termodinamik özelliklerini de hesaplayabilmek gerekir. Havanın termodinamik denklemlerini oluştururken havanın ideal gaz olduğu kabul edilir. Burada hava özgül ısı değerinin sıcaklığın fonksiyonu olarak değiştiği ancak basınç veya

entalpi denkleminde alınmıştır. Cp<sub>i</sub> denklemi kısmi devamlı olduğu için toplam entalpi integrasyonunun yanında kısmi devamlı bölgelerin entalpilerinin toplamından oluşur.

$$H(T) = H_0 + \left( \sum_{i=1}^{N-1} \int_{T_{Li}}^{T_{Hi}} Cp_i(T) .dT \right) + \int_{T_{Li}}^T Cp_i(T) .dT \quad (31)$$

bu denklemdeki H<sub>0</sub> entalpi sabiti referans değer olarak alınan 298 K noktasındaki entalpi olup değeri H<sub>0</sub>=8636.3959339 KJ/kmol olarak alınmıştır. Entropi formülü de entalpi formülünden çıkarılabilir.

$$s(T, P) = s_0 + \left( \sum_{i=1}^{N-1} \int_{T_{Li}}^{T_{Hi}} \frac{Cp_i(T)}{T} .dT \right) + \int_{T_{Li}}^T \frac{Cp_i(T)}{T} .dT + R \ln \frac{P}{P_0} \quad (32)$$

buradaki s<sub>0</sub>=49.101193319821995 KJ/kmol\*K dir. Referans basınç P<sub>0</sub>=1 bar olarak alınmıştır. Havanın formülü O<sub>0.419642</sub>N<sub>1.561756</sub>Ar<sub>0.009301</sub>C<sub>0.0003</sub> olarak alınmıştır ve bu formülle havanın moleküler ağırlığını M=28.964197 kg/kmol olarak hesaplamak mümkündür. Entalpi ve entropi değerleri M değeri kullanılarak KJ/kg bazına dönüştürülür. Havanın ek olarak termodinamik özelliklerinin de ısı transferi katsayılarının hesaplanması için bilinmesi gerekir. Havanın ısı iletim katsayısı ve viskozitesi için eğri uydurma formüllerinden yararlanılmıştır.[4,5]  
Viskozite;

**Çizelge 2.** Hava için özgül ısı denkleminin katsayıları (Specific heat eq. coefficients for air)

Ai (KJ/Kmol K)	Bi*10 <sup>3</sup> (KJ/Kmol K)	Ci*10 <sup>-5</sup> (KJ/Kmol K)	Di* 10 <sup>6</sup> (KJ/Kmol K)
9,0471613138	-0,43371335025	-0,00000234324	1,81771922391
7,2078049754	2,82769845957	0,65953188644	3,73015894390
3,1528875054	13,57204518133	1,77125763993	-3,8619139522
2,6263656207	2,90565403695	-21,5949288411	-0,4261720791
4,2818729959	1,66394564405	-30,4616728115	-0,1631941480
0,9090769614	-0,88928617682	-166,788901058	0,11814251617

yoğunluğun fonksiyonu olarak değişmediği varsayılacaktır. Ayrıca özgül ısı kısmi devamlı denklemler olarak verilecektir. Bunun sebebi hava entalpi denkleminin tablolarda verilen denklemlerle daha uyumlu olmasının sağlanmasıdır. Kuru hava için özgül ısı denklemi:

$$Cp_i(T) = A_i + B_i * 10^{-3} T + C_i * 10^5 / T + D_i * 10^{-6} T^2 \quad (30)$$

$T_{Li} > T > T_{Hi}$

şeklinde tanımlanmıştır. Bu denklemde yer alan Ai, Bi, Ci ve Di denklemin T<sub>Li</sub>, T<sub>Hi</sub> sıcaklık bölgesinde geçerli olan katsayılarıdır. Çeşitli sıcaklık aralıkları için farklı katsayılar tanımlamak mümkündür. Bu katsayılar gerçek tablo değerlerinden eğri uydurma yöntemleri yardımıyla elde edilebilirler. Eğri uydurmada en küçük kareler yöntemi genelde en yaygın kullanılan yöntemdir. Hava için kullanılan bu katsayılar tablo 2'de verilmiştir.

Bu sayıların elde edilmesinde kullanılan minimizasyon prosesinde Nelder-Mead tekniği kullanılmış ve tablo değerleri özgül ısı denkleminin integrasyonundan oluşan

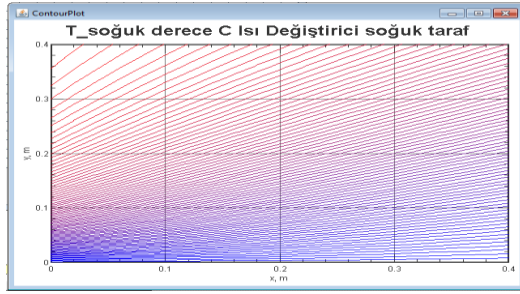
$$\mu(T) = -1.7167959014585676E-4 + 0.134117386651071 * T + 1.411177092362127E-4 * T^2 - 1.552370346991946E * T^3 - 6.040662038191801E-11 * T^4 \quad (33)$$

Isı iletim katsayısı;  
 $k(T) = -8.655726801976016E-9 + 0.005104868738271762 * T + 1.196160384893119E-4 * T^2 - 3.2012539563641695E-8 * T^3 + 1.2776708076950305E-11 * T^4 \quad (34)$

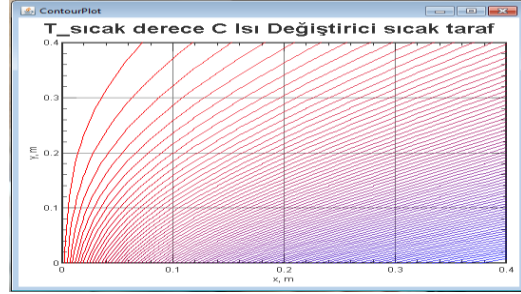
#### 4. PROGRAMIN GELİŞTİRİLMESİ VE ÖRNEK MODELLEME ÇALIŞMASI (DEVELOPMENT OF THE SIMULATION PROGRAM AND SAMPLE MODELING STUDY)

Çapraz akışlı ısı değiştirici modeli için java programlama dilinde çeşitli programlar geliştirilmiştir. Gazların termodinamik ve termodinamik özellikleri için Gas. Java, gaz karışımlarının termodinamik özellikleri için Gmix. java, hava- hava çapraz akışlı ısı değiştiricisi modeli için isidegisticisi1.java, yanma gazı -hava ısı değiştiricisi modeli için ise isidegisticisi2. Java programları

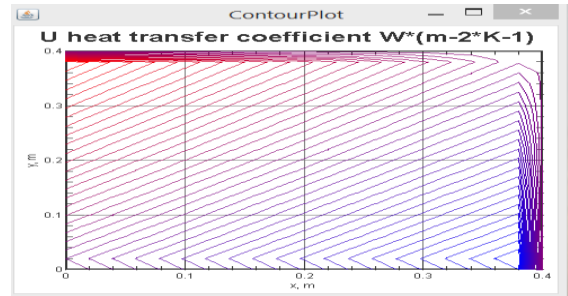
hazırlanarak önceki bölümde verilen denklemlerin çözülmesi sağlanmıştır. Örnek bir problem üzerinden model hesaplarını incelediğimizde; Temel olarak bir hava-hava ısı değiştiriciyi modellemek için veri olarak  $m_{\text{sıcak, gaz}} = 0,635 \text{ kg/s}$  ve  $m_{\text{soğuk, gaz}} = 0,54 \text{ kg/s}$ , levha boyutu  $= 0,5 * 0,5 \text{ m}^2$ , kanal yüksekliği  $= 2,25 \text{ mm}$ , levha sayısı  $= 140$  olarak ve hava giriş sıcaklıkları soğuk hava  $20^\circ\text{C}$  ve sıcak hava için  $75^\circ\text{C}$  alındığında bu durumda oluşabilecek program çıktıkları şekil 4-9'da verilmiştir:



**Şekil 4.a.** Isı değiştirici sonlu eleman analizi sıcaklık profili kontur grafiği (soğuk taraf) (Heat exchanger finite element analysis temperature profile contour plot (cold side))



**Şekil 4.b.** Isı değiştirici sonlu eleman analizi sıcaklık profili kontur grafiği (sıcak taraf) (Heat exchanger finite element analysis temperature profile contour plot (hot side))



**Şekil 5.** Isı değiştirici sonlu eleman analizi ısı transfer katsayısı kontur grafiği (Heat exchanger finite element analysis heat transfer coefficient contour plot)

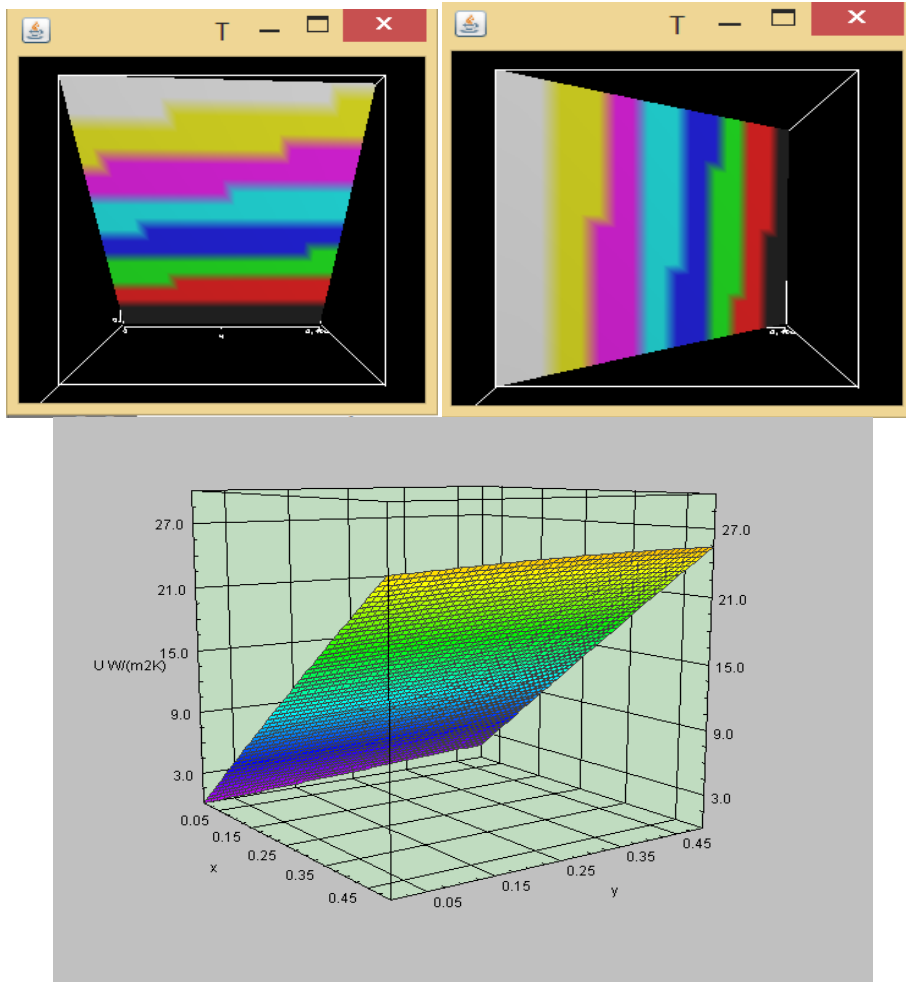
data output (veri çıkışı):																				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20.21881092	20.21777444	20.21664419	20.21555992	20.21450152	20.21348063	20.21239817	20.21135366	20.21020511	20.20904539	20.20821222	20.207182702	20.20619576	20.20514350	20.204113045	20.203124022	20.20212303	20.201127451	20.200113724	20.1991152374	20.19817281
20.43882894	20.43646420	20.43261141	20.42837027	20.42324077	20.41821206	20.41329444	20.40849644	20.40382786	20.40176653	20.40167047	20.417765546	20.41161517	20.408987965	20.407571105	20.40556592	20.40398695	20.401686574	20.39981188	20.397488828	20.39489833
20.65405692	20.65021616	20.64780303	20.64440293	20.64121986	20.63805424	20.63480571	20.63117742	20.62859673	20.62566204	20.62246120	20.619419973	20.61636928	20.61330866	20.61032319	20.607324569	20.60434210	20.601375680	20.59842523	20.59549049	20.59257192
20.87149534	20.86919574	20.86789248	20.86659494	20.86534042	20.86423435	20.86324610	20.86235490	20.86148039	20.86062223	20.85978064	20.85894949	20.85812868	20.85731812	20.85651781	20.85572775	20.85494794	20.85417838	20.85341907	20.85267001	20.85193119
21.08814475	21.08782824	21.07546755	21.07071132	21.06489377	21.05864072	21.05192143	21.04481168	21.03739965	21.03009855	21.03309968	21.02891931	21.02377497	21.01867352	21.01370756	21.00884410	21.00403874	20.99929157	20.99457323	20.98987453	20.98519437
21.30101250	21.29465104	21.28824314	21.281191023	21.27591156	21.26934951	21.26131108	21.25591887	21.25075596	21.24492328	21.23852686	21.23246298	21.22673266	21.22133596	21.21627252	21.21144246	21.20685322	21.19751123	21.19091045	21.185101035	21.17832287
21.51509424	21.50765193	21.50024884	21.49280773	21.48556635	21.47828246	21.47103882	21.46383420	21.45666635	21.44954049	21.44245204	21.43540121	21.42838803	21.42142568	21.41444448	21.40757566	21.40079858	21.393882310	21.38701953	21.38037027	21.37381867
21.72838382	21.71991857	21.71148925	21.70241693	21.69147669	21.67824237	21.67001892	21.66168191	21.65374287	21.64696793	21.63763787	21.62969079	21.62096898	21.62171059	21.61380479	21.60544200	21.59682278	21.590382016	21.58281774	21.57627228	21.56975268
21.94091225	21.93141202	21.92161297	21.91256478	21.90321714	21.89391876	21.88467231	21.87547451	21.86623095	21.85722628	21.84817894	21.839173719	21.83032194	21.821613438	21.81345480	21.80543469	21.79745481	21.78951528	21.78140305	21.77369933	21.76589823
22.15265178	22.14213388	22.13167257	22.12187447	22.11091825	22.10024656	22.09038868	22.08022048	22.07007338	22.05987752	22.04901088	22.03850687	22.02824571	22.01842586	22.008969429	22.00000429	21.99064951	21.98112123	21.97147104	21.96219619	21.95288623
22.36391383	22.35260579	22.34091965	22.32921503	22.317878154	22.30659883	22.29536952	22.28420425	22.27310166	22.26216937	22.25140322	22.24014832	22.22920868	22.218471318	22.20777930	22.197102491	22.18654835	22.17601514	22.16577289	22.15481048	22.14439857
22.57380002	22.56129933	22.54880579	22.53643091	22.52407857	22.51184169	22.49981915	22.48748136	22.47543234	22.46348073	22.45164570	22.43993266	22.4277786	22.41620536	22.40433849	22.392708973	22.38114519	22.369841754	22.358799228	22.34811742	22.33494992
22.78132199	22.76988609	22.75623256	22.74285087	22.72944088	22.71631084	22.70315345	22.69003526	22.67700666	22.66414737	22.65151575	22.63939209	22.62658278	22.61489788	22.60320786	22.591727191	22.57924220	22.56822329	22.55670416	22.54568221	22.53494992
22.99185132	22.97737667	22.96290155	22.94854407	22.93429588	22.92005382	22.90592292	22.89188743	22.87786770	22.863860279	22.85014472	22.83636880	22.82270242	22.80908800	22.79547229	22.78207458	22.76878887	22.75551114	22.742349375	22.72989074	22.71787866
23.19971986	23.18422568	23.16881432	23.15321423	23.13743091	23.12170854	23.10709804	23.09297933	23.07896238	23.06520644	23.04843831	23.031973719	23.01919133	23.010461553	22.99114362	22.97578208	22.96145648	22.94726362	22.93100150	22.916899024	22.90484848
23.40891882	23.3905711	23.37397244	23.35789023	23.34147473	23.32595205	23.30923132	23.29332743	23.27750007	23.26172748	23.24603094	23.231494158	23.21489580	23.198436681	23.18409900	23.16978288	23.15657634	23.13845046	23.1244048	23.11043806	23.0954840
23.61314861	23.59573756	23.57837750	23.56128772	23.54387044	23.52689013	23.50993203	23.49300420	23.47628251	23.45986531	23.44292701	23.426396140	23.40995248	23.39369534	23.37732476	23.36113868	23.34503873	23.32902452	23.31300332	23.29742561	23.28148153
23.81874884	23.80034238	23.78203116	23.76354908	23.74473508	23.72773109	23.70822226	23.69208012	23.67482895	23.658961514	23.63921793	23.61967966	23.60437435	23.587079459	23.56994723	23.55082524	23.53894793	23.51984972	23.50214028	23.48491891	23.46879736
24.02351233	24.01471381	23.99493489	23.96579373	23.94671117	23.92729256	23.90899891	23.89023363	23.87161613	23.85307823	23.83450511	23.81629440	23.79842417	23.77988900	23.76183272	23.743077094	23.72600223	23.70822769	23.69044281	23.67297256	23.65464026
24.22755280	24.20726783	24.18708896	24.16701864	24.14719312	24.12718312	24.10743769	24.08776822	24.06823820	24.04894984	24.02949849	24.01008488	23.99109800	23.972027904	23.95300759	23.934246453	23.91655032	23.89866428	23.87831236	23.85996172	23.84150820

**Şekil 6.** Isı değiştirici sonlu eleman analizi soğuk hava profili (Heat exchanger finite element analysis cold air profile)

data output (veri çıkışı):																				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
75.0	74.74387550	74.48918800	74.23541706	73.98306948	73.73196730	73.48210382	73.23347235	72.88966255	72.73807846	72.44400366	72.11134480	72.00856435	71.787187005	71.52699605	71.287881537	71.05814782	70.83478142	70.57799963	70.34381681	70.11041102
75.0	74.74479758	74.49082205	74.23515963	73.9817458	73.7348923	73.48753382	73.23974205	72.89319704	72.74287377	72.50173156	72.260738133	72.01956669	71.778497882	71.53911380	71.300910721	71.06380886	70.827860470	70.59225738	70.35975469	70.12724458
75.0	74.74517118	74.49282235	74.23880881	73.99032091	73.74089992	73.48888962	73.24599488	72.89900880	72.75882453	72.52535764	72.270439134	72.02851925	71.789778821	71.55120867	71.31380033	71.07755311	70.84246761	70.60859264	70.37598911	70.14014429
75.0	74.74635427	74.49450769	74.24361361	73.99304545	73.74548865	73.49820711	73.25223114	72.80740150	72.736795418	72.52131851	72.280448453	72.03985489	71.801028651	71.56328683	71.32659757	71.09120249	70.856888945	70.62371304	70.39186751	70.16075010
75.0	74.74745807	74.49532806	74.24333101	73.9915119	73.7498212	73.50877396	73.26845948	72.81471351	72.771984973	72.53007371	72.27963592	72.0303288	71.81225919	71.5752803	71.339483138	71.10416154	70.871283012	70.63880874	70.407202379	70.17447197
75.0	74.74846096	74.49614346	74.24401104	74.00114712	73.75445451	73.50895494	73.2645301	72.81452967	72.77958202	72.53800774	72.29319648	72.04290	71.823441992	71.58728716	71.352272379	71.11831962	70.885636811	70.65239822	70.42439822	70.19408685
75.0	74.74937056	74.49893888	74.24674358	74.00473324	73.75981651	73.51487019	73.27038869	72.82685698	72.787400665	72.54578145	72.30731143	72.07109902	71.83400041	71.59249817	71.35027447	71.11831962	70.88956811	70.6605911	70.43043348	70.21069307
75.0	74.75027783	74.50179932	74.25044393	74.00830951	73.76339540	73.51960014	73.27007052	72.82658137	72.78531545	72.55920394	72.318240509	72.08141920	71.845734025	71.61117904	71.37744803	71.14454389	70.91424896	70.68414298	70.455150918	70.22725937
75.0	74.75118219	74.50295977	74.25112645	74.01187596	73.76700207	73.52408663	73.2815947	72.84258844	72.802148619	72.56406891	72.32774802	72.09115442	71.856834843	71.62307973	71.390434025	71.15900369	70.92472248	70.69414692	70.470819592	70.244379916
75.0	74.75208425	74.50565623	74.25900783	74.01542633	73.77222651	73.53018253	73.28929452	72.84956544	72.810962286	72.57359063	72.337181795	72.10198365	71.867796573	71.63494221	71.403807210	71.17233514	70.942800114	70.71411646	70.486336502	70.260244988
75.0	74.75288707	74.50714589	74.26247606	74.01897825	73.77638701	73.53545184	73.29542287	72.85591519	72.818753465	72.58212150	72.346913863	72.11222386	71.87849388	71.64677544	71.415705308	71.18573028	70.95884832	70.72842478	70.50019087	70.27666800
75.0	74.75380800	74.50831168	74.26314493	74.02251616	73.78103863	73.54070654	73.30151388	72.85364572	72.82623184	72.59171344	72.35601948	72.1243603	71.88995867	71.6657841	71.442838010	71.				

data output(veri çıktısı) :																				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
22.62474182	22.62474182	22.61775979	22.61080345	22.60387570	22.59697545	22.59010292	22.58326710	22.57643880	22.56961464	22.56280352	22.55601435	22.54924303	22.54249248	22.53576248	22.52905325	22.52236482	22.51569728	22.50905162	22.50242782	22.49582588
22.62474182	22.61775979	22.61080345	22.60387570	22.59697545	22.59010292	22.58326710	22.57643880	22.56961464	22.56280352	22.55601435	22.54924303	22.54249248	22.53576248	22.52905325	22.52236482	22.51569728	22.50905162	22.50242782	22.49582588	22.48924572
22.63333338	22.62683278	22.61934895	22.61123888	22.60264764	22.59281690	22.58197138	22.57017382	22.55746038	22.54388404	22.52950012	22.51436364	22.49852968	22.48214288	22.46525832	22.44793208	22.43022008	22.41217848	22.39385328	22.37529988	22.35656288
22.64188710	22.63483085	22.62785871	22.62098829	22.61324158	22.60474650	22.60013484	22.59327282	22.58438804	22.57362012	22.56102912	22.54766512	22.53358704	22.51884496	22.50358784	22.48787576	22.47176864	22.45531648	22.43857928	22.42161704	22.40446972
22.65040310	22.64335283	22.63633078	22.62933854	22.62237013	22.61543444	22.60852037	22.60163684	22.59478075	22.58795200	22.58115040	22.57437416	22.56763288	22.56092664	22.55425592	22.54762024	22.54102008	22.53445584	22.52792704	22.52143312	22.51497360
22.65889154	22.65186070	22.64476588	22.63755028	22.63025024	22.62288254	22.61647031	22.60996571	22.60338863	22.59673897	22.59011668	22.58352244	22.57695632	22.57041824	22.56390864	22.55742688	22.55097232	22.54454528	22.53814512	22.53177136	22.52542240
22.66732255	22.66022840	22.65316475	22.64612765	22.63911884	22.63213795	22.62518489	22.61825954	22.61136181	22.60449165	22.59764884	22.59083334	22.58404518	22.57728440	22.57055008	22.56384224	22.55716032	22.55050384	22.54387232	22.53726528	22.53068224
22.67572828	22.66861216	22.66152836	22.65446878	22.64743327	22.64042279	22.63343642	22.62647420	22.61953604	22.61262192	22.60573084	22.59886184	22.59201496	22.58518928	22.57838480	22.57160160	22.56483968	22.55809896	22.55137944	22.54468032	22.53801184
22.68408206	22.67695183	22.66985180	22.66277377	22.65572383	22.64870219	22.64171045	22.63474860	22.62781665	22.62091463	22.61404142	22.60719710	22.60038168	22.59359416	22.58683464	22.58010312	22.57340960	22.56674416	22.56010672	22.55349736	22.54691608
22.69242244	22.68529744	22.67814892	22.67104279	22.66397295	22.65694128	22.64994769	22.64298308	22.63594745	22.62894091	22.62196440	22.61501796	22.60809160	22.60119536	22.59432924	22.58749312	22.58068704	22.57391096	22.56716496	22.56044896	22.55376296
22.70071516	22.69354023	22.68639386	22.67927597	22.67219844	22.66516218	22.65816807	22.65121612	22.64430645	22.63743907	22.63061388	22.62383089	22.61708910	22.61038064	22.60370344	22.59705760	22.59044312	22.58385992	22.57730808	22.57078760	22.56429848
22.70897115	22.70177692	22.69461075	22.68747343	22.68036455	22.67328401	22.66623171	22.65920754	22.65221141	22.64524318	22.63830289	22.63138014	22.62448588	22.61761912	22.61078084	22.60397104	22.59718976	22.59043592	22.58370944	22.57701032	22.57033848
22.71718955	22.70997677	22.70279173	22.69563630	22.68851040	22.68141392	22.67433674	22.66727877	22.66024091	22.65322304	22.64622516	22.63924728	22.63228938	22.62535144	22.61843344	22.61153536	22.60465712	22.59779872	22.59096016	22.58414136	22.57734232
22.72537348	22.71814080	22.71093691	22.70376172	22.69661512	22.68949701	22.68240728	22.67534583	22.66831254	22.66130732	22.65432016	22.64735104	22.64040096	22.63346992	22.62655792	22.61966496	22.61279104	22.60593712	22.59910224	22.59228632	22.58548936
22.73352012	22.72628884	22.71904844	22.71182821	22.70463874	22.69746952	22.69032045	22.68319154	22.67609288	22.66902436	22.66208596	22.65516768	22.64826944	22.64139124	22.63453304	22.62769484	22.62087664	22.61407848	22.60729032	22.60051216	22.59375400
22.74163067	22.73436104	22.72712045	22.71990870	22.71272597	22.70557127	22.69844538	22.69134730	22.68427811	22.67723774	22.67022620	22.66324348	22.65628968	22.64936472	22.64246864	22.63559232	22.62873576	22.62189896	22.61508192	22.60828464	22.60150712
22.74971497	22.74244751	22.73515807	22.72792822	22.72072876	22.71355988	22.70643198	22.69932615	22.69224247	22.68518095	22.67814160	22.67112444	22.66412944	22.65715664	22.65020592	22.64327728	22.63637072	22.62948624	22.62262384	22.61578352	22.60896528
22.75774346	22.75043840	22.74316242	22.73591538	22.72869721	22.72150778	22.71434698	22.70721470	22.70011084	22.69303528	22.68598794	22.67896882	22.67197792	22.66501524	22.65808080	22.65117456	22.64429648	22.63744656	22.63062480	22.62383112	22.61706544
22.76574917	22.75842384	22.75113863	22.74388644	22.73663117	22.72940468	22.72220688	22.71503768	22.70789708	22.70088458	22.69389824	22.68693804	22.67999408	22.67306632	22.66615472	22.65925928	22.65238000	22.64551688	22.63866992	22.63183912	22.62502432
22.77371223	22.76637395	22.75906384	22.75178281	22.74453074	22.73730752	22.73011304	22.72294719	22.71580987	22.70870095	22.70162035	22.69456799	22.68754361	22.68054627	22.67357680	22.66663520	22.65971136	22.65280528	22.64591592	22.63904328	22.63218736
22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539	22.83095539

Şekil 8. Isı değiştirici sonlu eleman analizi toplam ısı transferi katsayısının (W/m<sup>2</sup>K) yerel değişimi(The heat exchanger finite element analysis is the local change of the total heat transfer coefficient(W/m<sup>2</sup>K))



Şekil 9. Isı değiştirici sonlu eleman analizi sıcak ve soğuk hava toplam ısı transferi katsayısı profillerinin üç boyutlu görünümü (Heat exchanger finite element analysis, three-dimensional view of hot and cold air total heat transfer coefficient profiles)

**Giriş ve ortalama çıkış sıcaklıkları:**

$T_{\text{sıcak,giriş}}=75.0^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{sıcak, çıkış}}=25.476852729566836^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{soğuk,giriş}}=20.0^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{soğuk, çıkış}}=68.57252699001823^{\circ}\text{C}$

**Toplam Isı Transferi:**

$Q=45455,26866906542$  W olarak bulunmuştur.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Bu çalışmada sıcak hava veya sıcak yanma gazları kullanılarak havayı ısıtan çapraz akışlı levha tipi ısı değiştiricinin iki boyutlu sıcaklık profili ve ısı transferi değişimi temel diferansiyel denklemlerin sonlu fark denklemlerine dönüştürülmesiyle Java programlama dili kullanılarak geliştirilen matematiksel model yardımıyla adım adım ilerlenerek hesaplanmış ve bu tarz ısı değiştiricilerinin tasarımı ve boyutlandırılması uygulamalarında oldukça etkin sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. İki boyutlu analiz lineer olmayan bir sıcaklık profilini işaret etmektedir. Aynı zamanda köşegen olarak sıcak ve soğuk noktalar oluşmaktadır. Bu çalışma için örnek olarak 0,5\*0,5 m<sup>2</sup> levha boyutlarına, 2,25 mm kanal yüksekliğine sahip bir levha tipi çapraz akışlı ısı değiştiricide 75<sup>0</sup>C sıcaklığa sahip sıcak hava ile 20<sup>0</sup>C sıcaklığa sahip soğuk havanın sıcaklık profilleri ve ısı transfer katsayısının dağılımı incelenmiş ve sonuç olarak böyle bir üniteye ısı transferi değerinin yaklaşık 45,5 KW olduğu belirlenmiştir. Örnekte debi değerleri sıcak hava için 0,635 kg/s, soğuk hava için ise 0,54 kg/s olarak alınmıştır. Bu örnekte de görüldüğü üzere yüksek debi değerlerinde daha uniform bir sıcaklık profili ortaya çıkmaktadır. Geliştirilen matematiksel modelleme çalışmasında debi değerleri daha düşük olarak alındığında sıcaklık profilinin daha belirgin bir şekilde görülmesi sağlanabilir.

Bu çalışmada modellemesi gerçekleştirilen çapraz akışlı ısı değiştiriciler günümüzde çoğu endüstri tarafından yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Dolayısıyla, bu tarz sistemlerin birçok endüstriyel uygulama için performansını çok daha kolay, hızlı ve etkin bir şekilde belirleyebilmek ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla bu tarz simülasyon programlarının geliştirilmesi çok daha önemli hale gelmektedir. Böylelikle herhangi bir sistem için ihtiyaç duyulan ısı değiştiricinin performans değerleri bu sayede hızlı, kolay ve etkin bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

### Simgeler(Nomenclature)

- A- Kesit alanı (m<sup>2</sup>)  
 $C_{p_c}$  - Soğuk akışkan için özgül ısı değeri (kJ/kg/K)  
 $C_{p_h}$  - Sıcak akışkan için özgül ısı değeri (kJ/kg/K)  
dA- Plaka üzerindeki her bir dilimin yüzey alanı(m<sup>2</sup>)  
dQ- Plaka üzerinde bölünen her bir parçanın yüzeyinden geçen ısı transfer miktarı(W)  
 $D_H$  - Hidrolik çap (m)  
f- Boru sürtünme faktörü  
 $h_c$  - Soğuk akışkan için ısı taşınım katsayısı (W/m<sup>2</sup>\*K)  $h_h$  - Sıcak akışkan için ısı taşınım katsayısı (W/m<sup>2</sup>\*K)  $H_c$  - Soğuk akışkan için entalpi değeri (kJ/kg)  
 $H_h$  -Sıcak akışkan için entalpi değeri (kJ/kg)  
k- Isı iletim katsayısı(W/m\*K)  
 $k_t$  -Metal için ısı iletim katsayısı (W/m\*K)

- L - Plaka Sayısı  
m- Kütle debisi (kg/s)  
 $m_c$  - Soğuk akışkan için kütle debisi (kg/s)  
 $m_h$  - Sıcak akışkan için kütle debisi (kg/s)  
P- Çevre uzunluğu (m)  
Pr- Prandtl sayısı  
 $R_c$  - Soğuk akışkan için yüzey kirlilik direnci (m<sup>2</sup>\*K/W)  
 $R_h$  -Sıcak akışkan için yüzey kirlilik direnci (m<sup>2</sup>\*K/W)  
Re<sub>D</sub> - Reynold's sayısı  
 $Q_{m,n}$  - Isı değiştirici plakalarından geçen toplam ısı transferi (W)  
s - Metal et kalınlığı (m)  
 $T_{cm,n}$  - x yönündeki soğuk akışkan sıcaklığı(K)  
 $T_{hm,n}$  - y yönündeki sıcak akışkan sıcaklığı (K)  
 $U_{m,n}$  - Toplam ısı transfer katsayısı (W/m<sup>2</sup>K)  
V- Ortalama hız (m/s)  
 $V_{hm,n}$  -Sıcak akışkanın hızı (m/s)  
 $V_{cm,n}$  -Soğuk akışkanın hızı (m/s)  
 $\Delta A_{m,n}$  -Sonlu eleman üzerindeki ısı transferi alanı(m<sup>2</sup>)  
 $\rho$  -Gaz yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\rho_h$  -Sıcak akışkanın yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\rho_c$  -Soğuk akışkanın yoğunluğu(kg/m<sup>3</sup>)  
 $\mu$  -Viskozite (kg/m\*s)

### KAYNAKLAR(REFERENCES)

- [1] Abraham, J.P., Sparrow, E.M. Tong, J.C.K., "Heat transfer in all pipe flow regimes: laminar, transitional/intermittent and turbulent", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52: 557–563, (2009).
- [2] Cadavid Y., Amell A., Cadavid F., "Heat transfer model in recuperative compact heat exchanger type:experimental and numerical analysis", *Applied Thermal Engineering*, 50-56, (2013).
- [3] Çengel, Y.A., "Isı ve Kütle Transferine Pratik Bir Yaklaşım", 3.Basım, Güven Kitabevi, İzmir.(2011).
- [4] Çoban, M.T., "İdeal gazların termodinamik ve termofiziksel özelliklerinin modellenmesi", *17. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, 24-27 Haziran (2009), Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.
- [5] Çoban, M. T., "Sürekli kanatlı, zorlanmış taşınım hava su ısı değiştiricinin modellenmesi", *ULIBTK' 13-19. Ulusal Isı Bilimi ve Tek. Kongresi*, Samsun, (2013).
- [6] Gnielinski V., "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow", *Int. Chem. Eng.* 16: 359–367, (1976).
- [7] Goudar, C.T. and Sonnad, J.R., "Comparison of the iterative approximations of the Colebrook-White equation", *Hydrocarbon Processing*, pp 79-83, (2008).

- [8] Hajabdollahi, H., Seifoori S., “Effect of flow maldistribution on the optimal design of a cross flow heat exchanger”, *Int. J. Therm. Sci.*, 109: 242- 252, (2016).
- [9] Incropera,F.P., Dewitt,D.P., “Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri”,7. Basım, *Palme Yayıncılık*, Ankara, (2015).
- [10] Liu, P., Nasr, M.R., Ge, G., Alonso, M.J., Mathisen, H.M., Fathieh, F., Simonson, C., “A theoretical model to predict frosting limits in cross-flow air-to-air flat plate heat/energy exchangers”, *Energy and Buildings*, 110: 404-414, (2016).
- [11] Navarro H.A., Cabezas-Gomez L.C., “Effectiveness-NTU computation with a mathematical model for cross-flow heat exchangers”, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol.:24, No:04, PP.:509-521, ISSN 0104-6632, (2007).
- [12] Oğulata R.T., Doba F., Yılmaz T., “Irreversibility analysis of cross-flow heat exchangers”, *Energy Conversion & Management*, 1585-1599, (2000).
- [13] Rogiers F., Stevens T., Baelmans M., “Optimal recuperator design for use in a micro gas turbine”, *The Sixth International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications*, Berkeley, U.S.A, (2006).
- [14] Quadir,G.A., Badruddin, I.A., Ahmed, N.J.S., “Numerical investigation of the performance of a triple concentric pipe heat exchanger”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 75:165-172, (2014).
- [15] Saha, K.S., Baelmans, M., “A design method for rectangular microchannel counter flow heat exchangers”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 74: 1-12, (2014).
- [16] Strace, G., Fiorentino, M., Longo, M.P., Carluccio, E., “A hybrid method for the cross flow compact heat exchangers design”, *Appl. Therm. Eng.*, 111: 1129-1142, (2017).
- [17] Taler D., Trojan M., Taler J., “Numerical Modeling of Cross-Flow Tube Heat Exchangers with Complex Flow Arrangements”, *Cracow University of Science and Technology*, (AGH), Poland, (2011).
- [18] Vafajoo, L., Moradifar, K., Hosseini, S.M., Salman, B.H., “Mathematical modelling of turbulent flow for flue gas-air Chevron type plate heat exchangers”, *Int.J. Heat Mass Transf.*, 97:596-602, (2016).
- [19] Vaitekunas D.A., “A generic dynamic model for cross flow heat exchangers with one fluid mixed, A thesis submitted to the faculty of graduate studies and research in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering”, *McGill University*, Montreal, Canada, (1990).
- [20] Vali A., Simonson C.J., Besent R.W., Mahmood G., “ Numerical model and effitiveness correlations for a run-around heat recovery”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 5827-5840, (2009).
- [21] VDI Heat Atlas Second Edition., “**VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen**”, ISBN 978-3-540-77876-9 e-ISBN 978-3-540-77877-6 Springer Heidelberg Dordrecht London New York, (1993).
- [22] Yang, J. Ma, L., Bock, J., Jacobi, A.M., Liu, W., “ A ,comparison of four numerical modeling approaches for enhanced shell-and-tube heat exchangers with experimental validation”, *Appl. Therm. Eng.*, 65:369-383, (2014).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

# Reaktif pudra betonlarının basınç dayanımının anfıs ile tahmini

## *Predicting the compressive strength of RPC by ANFIS*

*Yazarlar (Authors): İlker Bekir TOPÇU<sup>1\*</sup>, Eyyüp GÜLBANDILAR<sup>2</sup>, Ahmet Burak KOCA<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-2075-6361*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-5559-5281*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-3344-273X*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Topçu İ.B., Gülbandır E. ve Koca A.B., “Reaktif pudra betonlarının basınç dayanımının ANFIS ile tahmini”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 165-171, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.385923



# Reaktif Pudra Betonlarının Basınç Dayanımının ANFIS ile Tahmini

*Araştırma Makalesi / Research Article*

İlker Bekir TOPÇU<sup>1\*</sup>, Eyyüp GÜLBANDILAR<sup>2</sup>, Ahmet Burak KOCA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh.-Mim. Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

<sup>2</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh.-Mim. Fakültesi, Bilgisayar Müh. Bölümü, Eskişehir, Türkiye

<sup>3</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh.-Mim. Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

(Geliş/Received : 30.01.2017 ; Kabul/Accepted : 28.04.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada, Reaktif Pudra Betonlarının (RPB) deneysel sonuçları incelenerek Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) ile basınç dayanımını tahmin için bir modelin tasarımı araştırılmıştır. Bu modeli inşa etmek için 42 numunenin 7. ve 28. gün basınç dayanımları, ANFIS modelinin eğitim aşamaları için alınan deneylerden elde edilmiştir. Bu verilerden, hidrasyon günü, Portland Çimento (PÇ), silis dumanı, kuvars kumu, kum, su, süper akışkanlaştırıcı ve çelik lif olmak üzere 8 giriş parametresi ve betonun basınç dayanım çıkış parametresi olarak ANFIS modelinde kullanılmıştır. ANFIS modelinin 0,015 hata ile eğitim performansına sahip olduğu bulunmuştur. ANFIS test sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, sırasıyla R<sup>2</sup>, RMS ve MAPE için 0,9909, 0,0277 ve 0,0004 istatistiksel olarak doğruluk olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, ANFIS modelinin RPB'nin 7. ve 28. gün basınç dayanımlarının tahmini için yararlı bir model olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Reaktif pudra betonu, basınç dayanımı, ANFIS.

# Predicting the Compressive Strength of Reactive Powder Concretes by ANFIS

## ABSTRACT

This study is designed to investigate the experimental results of Reactive Powder Concretes (RPC) with the adaptive neural fuzzy inference systems (ANFIS) prediction model. In order to construct this model, the compressive strengths of 42 samples on the 7th and 28th days were obtained from the experiments for the training stages of the ANFIS model. This data was used on ANFIS model as hydration day, 8 input parameters including Portland cement, silica smoke, quartz sand, sand, water, super plasticizer and steel fiber and compressive strength of concrete as output parameter. The ANFIS model presented training performance with 0.015 error. When ANFIS test results compared with experimental results, it found that R<sup>2</sup>, RMS and MAPE were statistically accurate to 0.9909, 0.027 and 0.0004, respectively. The test results show that ANFIS model is a convenient to use and simple model for estimating the compressive strengths of 7th and 28th days of RPC

**Keywords:** Reactive powder concrete, pressure resistance, ANFIS

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beton, Dünya'da en çok tercih edilen ve her geçen gün teknolojinin gelişmesiyle özellikleri iyileştirilen bir yapı malzemesi olarak yerini almaktadır. Reaktif pudra betonu (RPB) ise basınç dayanımı 150 ile 800 MPa arasında, çekme dayanımı 25 ile 150 MPa arasında, kırılma enerjisi yaklaşık 30000 J/m<sup>2</sup>, elastisite modülü 50000 ile 75000 MPa arasında ve birim ağırlığı 2500-3000 kg/m<sup>3</sup> değerleri arasında olan bir beton türüdür. Bu özellikleri ile RPB'ler üstün mekanik ve fiziksel özelliklere, mükemmel süneklige ve çok düşük geçirimsizliğe sahip ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit olmuştur [1,2].

RPB, normal betondan farklı olarak, homojenliğin artırılması için mikro boyuttaki tanelerin kullanımı, tane dağılımın betonda en az boşluk oluşturacak şekilde düzenlenmesi, puzolanik aktivitenin en üst düzeyde gerçekleşmesi için SD kullanılması ve sıcak kür

uygulanmasıyla üretilmiştir [1]. Çimento ile üretilen kompozitlerin yüksek mekanik özelliklere erişebilmesi konusunda son yıllarda birçok araştırma gerçekleştirilmiştir. İlk olarak 1930'larda Freyssinet taze betona priz sırasında uygulanacak basıncın betonun basınç dayanımını artırmada olumlu etkisi olduğunu söylemiştir. 1960'larda ise yüksek sıcaklıkla artan basınç kürü uygulanarak beton basınç dayanımı 650 MPa'ya ulaşmıştır [3].

Reaktif pudra betonu liflerle güçlendirilmiş, çok düşük su-çimento oranında PÇ ve SD karışımının süper akışkanlaştırıcı kullanılarak ince öğütülmüş kuvars unuyla karıştırılması sonucu elde edilen yüksek dayanımlı kompozit olarak bir cümle ile tanımlanabilir. Karışımında çok ince agrega kullanılması sayesinde yapıdaki mikro boşluklar azaltılarak eğilme ve basınç dayanımında artış sağlanabilmiştir. Normal betonlarda kullanılan rijit agrega tanelerinin birbirine teması sonucu matris boyunca oluşan ara yüzdeki boşluklar tane çapının

azaltılması ile ortadan kaldırılmaktadır. Karışımda gerçekleştirilen bu düzenleme ile betonun boşluk oranı azaltılmakta donma-çözülme gibi çevresel etkilerine karşı direnci ise artmaktadır. Normal çimento içerikli kompozitler ile karşılaştırıldığında RPB'nin en belirgin özelliği homojen yapısı, düşük boşluk oranı ve güçlendirilmiş çimento matrisidir. Karışımda ince taneli agreganın ultra ince bir malzeme olan silis dumanı ile birlikte kullanılması agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki temas yüzeyini artırarak mekanik özelliklerin iyileşmesine olanak vermektedir. Boşlukların azaltılarak sıklığının artırılmasının bir diğer yararı da karışım suyunun azaltılmasına olanak vermesidir [4].

## 2. REAKTİF PUDRA BETONUNUN MEKANİK ÖZELLİKLERİ (MECHANICAL PROPERTIES OF REACTIVE POWDER CONCRETE)

Mekanik özellikler açısından RPB'nde oluşan C-S-H jel yapısının kuvvetlenmesiyle kompozitin yoğun matris yapısı basınç dayanımı en üst değere taşımaktadır. Bu yüksek dayanım RPB'nin yapılarda çelik donatı olmaksızın kullanılmasını sağlamıştır. Kırılma enerjisi açısından bakıldığında ise RPB'nin normal harç numunelere oranla 240 kat daha fazla bir enerjiyi karşıladığı görülmüştür. Buda özellikle deprem etkileri altında enerji yutma kapasitesi düşük olan gevrek beton malzemenin tokluğunun artması demektir. Böylece RPB kullanılan yapılarda sünekliği artan yapısal elemanlar depreme karşı daha dayanıklı bir davranış gösterebilmektedir. Normal (NDB), yüksek dayanımlı (YDB) ve RPB'lere ait bir karşılaştırma Çizelge 1'de yapılmaktadır [5,6].

Çizelge 1. NDB, YDB ve RPB karşılaştırılması (Comparison of NSC, HSC and RPC)

Mekanik Özellikler	NDB	YDB	RPB
Basınç Dayanımı, MPa	20 - 60	60 - 115	200 - 800
Eğilme Dayanımı, MPa	4 - 8	6 - 10	50140
Kırılma Enerjisi, J/m <sup>2</sup>	100 - 120	100 - 130	10000 - 40000
Elastisite Modülü, GPa	20 - 30	35 - 40	60 - 75

RPB'lar Yüksek Performanslı Betonlara iyi bir alternatiftir ve yapısal olarak çelik ile yarışacak bir potansiyele sahiptir. Üstün dayanımı yüksek kesme kapasitesiyle birleşerek önemli ölçüde ölü yük azalmasına ve limitsiz yapısal eleman şekline olanak verirler. Sünek yapısıyla doğrudan gelen bütün çekme kuvvetlerine karşı koyabilirler. Daha hafif elemanlarla atalet yüklerini azaltarak, azalan kesit alanlarıyla daha büyük sehime izin vererek ve daha yüksek enerji yutmayı sağlayarak sismik performansta gelişim sağlarlar. Düşük ve birbirine bağlı olmayan boşluk oranı önemli dayanıklılık ve taşıma özellikleri sağlar ve nükleer

malzemelerin depolanması için en uygun malzemedirler [7]. Yüksek dayanımlı betonlarla (YDB) karşılaştırıldıklarında RPB'lerin fiziksel özelliklerinin çok daha üstün olduğu Çizelge 2'de görülmektedir [6].

Çizelge 2. RPB ile YDB karşılaştırılması (Comparison of RPC and HSC) [7]

Aşınma Kapasitesi	2.5 kat az
Su Emmesi	7 kat az
Korozyon Hızı	8 kat az
Klorür İyonu Difüzyonu	25 kat az

## 3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

### 3.1 Malzeme (Materials)

#### 3.1.1 Portland Çimentosu (Portland Cement)

Bağlayıcı olarak CEM I 52,5 R tipi PÇ kullanılmıştır. PÇ'nin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Temel fiziksel ve kimyasal özellikleri (Basic physical and chemical properties)

Görünüm	Gri veya beyaz granül toz	Bağlı Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2,75 - 3,2
Koku	Yok	Görünür Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	0,9 - 1,5
pH (Suda) 20 °C	9 - 14	Viskozite cPs 25 °C	Uygulanması yok.
Kaynama Noktası (°C) 760 mmHg	Uygulanması yok.	Buhar Basıncı hPa 20°C	Uygulanması yok.
Erime Noktası (°C)	>1200 °C	Patlama Tehlikesi	Ürünün patlama tehlikesi yoktur.
Parlama Noktası (°C) 760 m	Uygulanması yok.	Oksidasyon Özellikleri	Uygulanması yok.
Kendiliğinden Alevlenme Sıcaklığı (°C)	Uygulanması yok.	Ortalama Tane İriligi (Mikron)	1 - 30
Ayrılma Sıcaklığı (°C)	Uygulanması yok.	Suda Çözünürlülük (%)	0,1 - 1,5
Ayrılma Katsayısı	Uygulanması yok.	Buhar Yoğunluğu	Uygulanması yok.

#### 3.1.2 Silis Dumanı (Silica Fume)

Silis dumanı silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozdur [7].

Bu malzemenin başlıca özellikleri; %85'ten %98'e kadar SiO<sub>2</sub> içeriği, 0.1-0.2 mikron tane büyüklüğü, küresel tane şekli ve amorf yapısıdır [10].

Yapılan araştırmalar SD'li üretimlerde en iyi sonuçların zirkonyum endüstrisinden sağlanan silis dumanlarının kullanımı ile elde edildiğini göstermektedir. Bunun nedeni bu malzemelerin bütün kirlilik ve tortulaşmadan arınmış olmasıdır [1].

### 3.1.3 Kuvars Unu (Quartz Sand)

Ortalama tane boyutu 4 µm veya 300-1180 µm aralığında olan kuvars kumu kullanımı hemen hemen aynı basınç ve çekme dayanımlarını vermektedir.

### 3.1.4 Çelik Lif (Steel Fiber)

Bu çalışmada düz şekilli kısa kesilmiş çelik lifler kullanıldı, üstü pirinç kaplı ve sarı renkte olup, özellikleri Çizelge 4'de verilmektedir.

**Çizelge 4.** Çelik Lifin teknik özellikleri  
(Mechanical properties of steel fiber) [11].

Boy (mm)	6
Çap (mm)	0,15
Narınlik	37,5
Özgül Ağırlık (kg/dm <sup>3</sup> )	7,85
Çekme Dayanımı (MPa)	2250

### 3.1.5 Su-Çimento Oranı (Water-Cement Ratio)

Reaktif pudra betonlarında su/çimento oranı çok düşük olup, 0,15 civarlarındadır. Su/çimento oranının düşük olması, tüm çimento tanelerinin hidrate olmasını engeller. Hidrate olmayan çimento taneleri, RPB'de kullanılan agrega boyutuna yakın olduğundan beton dayanımına katkıda bulunurlar. Su/çimento oranının azalması ile çimento hamurundaki ortalama boşluk çapı küçülür, toplam boşluk miktarı azalır [3].

## 4. UYARLAMALI SİNİRSEL BULANIK ÇIKARIM SİSTEMLERİ (ADAPTIVE NEURAL FUZZY INFERENCE SYSTEMS)

Uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemleri (Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems: ANFIS) hem sinir ağlarını hem de bulanık çıkarım sistemlerini içeren bir karma sistem olarak ifade edilmektedir. Bu karma sistemlerde; bulanık çıkarım, belirsizlik ve kararsızlık durumlarını irdelerken, sinirsel ağ uyarlanabilirliği irdelenmektedir. Karma sistemler genellikle Sugeno bulanık model olarak adlandırılmaktadır. Takagi, Sugeno ve Kang, giriş-çıkış veri kümelerinden bulanık kurallar üretebilen bu modeli önermişlerdir. Tipik bir bulanık kural formatı Denklem (1)'deki gibidir.

If  $x$  is  $A$  and  $y$  is  $B$  then  $z = f(x,y)$  (1)

Burada  $A$  ve  $B$  bulanık önerme kümelerini,  $z=f(x,y)$  ise çıkarımdaki ham fonksiyonunu göstermektedir. Genellikle  $f(x,y)$ ,  $x$  ve  $y$  giriş değişkenlerini göstermek üzere bir polinom fonksiyonudur. Eğer  $f(x,y)$  birinci dereceden bir polinom ise bu model, birinci derece Sugeno bulanık model olarak tanımlanır. Eğer  $f$  sabit ise, sıfıncı derece Sugeno bulanık model denir. Birinci derece Sugeno bulanık çıkarım sistemi için aşağıdaki gibi iki bulanık çıkarım If-then kuralları Denklem (2) ve (3) ile örneklenebilir.

If  $x$  is  $A_1$  and  $y$  is  $B_1$ , then  $f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1$  (2)

If  $x$  is  $A_2$  and  $y$  is  $B_2$ , then  $f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2$  (3)

Bu çıkarım sisteminde her bir kuralın çıkışı, sabit terimin eklenmesi ile giriş değişkenlerinin doğrusal bir kombinasyonudur. Son çıkış, her bir kuralın çıkışının ağırlık ortalamasıdır ( $w_i$ ) [8]. Projede elde edilen ANFIS mimarisinin yapısı Şekil 1'de görülmektedir.

Aşağıda aynı katmandaki düğüm fonksiyonunun davranışları ayrıntılı olarak ifade edilmektedir (Not:  $O_i^j$ ,  $j$ -inci tabakadaki  $i$ -inci düğümün çıkışını göstermektedir).

**1. Katman:** Bu katmandaki her  $i$  düğüm, düğüm fonksiyonuyla uyumlu davranış gösterir ve çıkışı aşağıdaki gibidir.

$$O_i^j = A_i(x), \quad \text{ için } i = 1,2$$

$$O_i^j = B_{i-2}(y), \quad \text{ için } i = 3,4$$

Burada  $x$  veya  $y$   $i$ -inci düğüm için girişleri ve  $A_i$  veya  $B_{i-2}$  ise uzun, kısa gibi dilsel ifadeleri göstermektedir. Diğer bir ifadeyle  $O_i^j$ , birinci katman için  $j = 1$  alınırsa ve  $A$  veya  $B$  bulanık kümelerinin üyelik derecelerini göstermektedir ve Denklem (4) ile gösterilmektedir.

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[ \frac{(x - c_i)}{a_i} \right]^{2b_i}} \quad (4)$$

Burada  $\{a_i, b_i, c_i\}$  küme parametrelerini göstermektedir. Genelleştirilmiş çan eğrisi üyelik fonksiyonu için bu parametrelerin değerleri  $A_i$  dilsel etiketin üyelik derecesini verir. Bu üyelik derecesi fonksiyonlarının değişik tipleri bulunmaktadır ve üyelik fonksiyonuna tipine göre Denklem 4 değişiklik göstermektedir. Bu katmandaki parametreler öncül parametreler olarak tanımlanmaktadır. Bu katmanın çıkışı öncül kısmın üyelik derecesinin değeridir [8].

**2. Katman:** Bu katmandaki her bir düğüm cebirsel çarpma operatörü yardımıyla bir kuralın bulanık çıkarımı ile Denklem (2)'deki gibi hesaplanmaktadır (Genellikle T-norm dönüşümü için mantıksal  $VE$  işlemi tercih edilebilir) [8].

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \quad i = 1,2,\dots,n \quad (2)$$

**3. Katman:** Bu katmandaki  $i$ -inci düğümün bulanık çıkarımının bütün düğümlerin bulanık çıkarımlarının toplamının oranlanmasıyla Denklem (3)'deki hesaplanmaktadır [8].

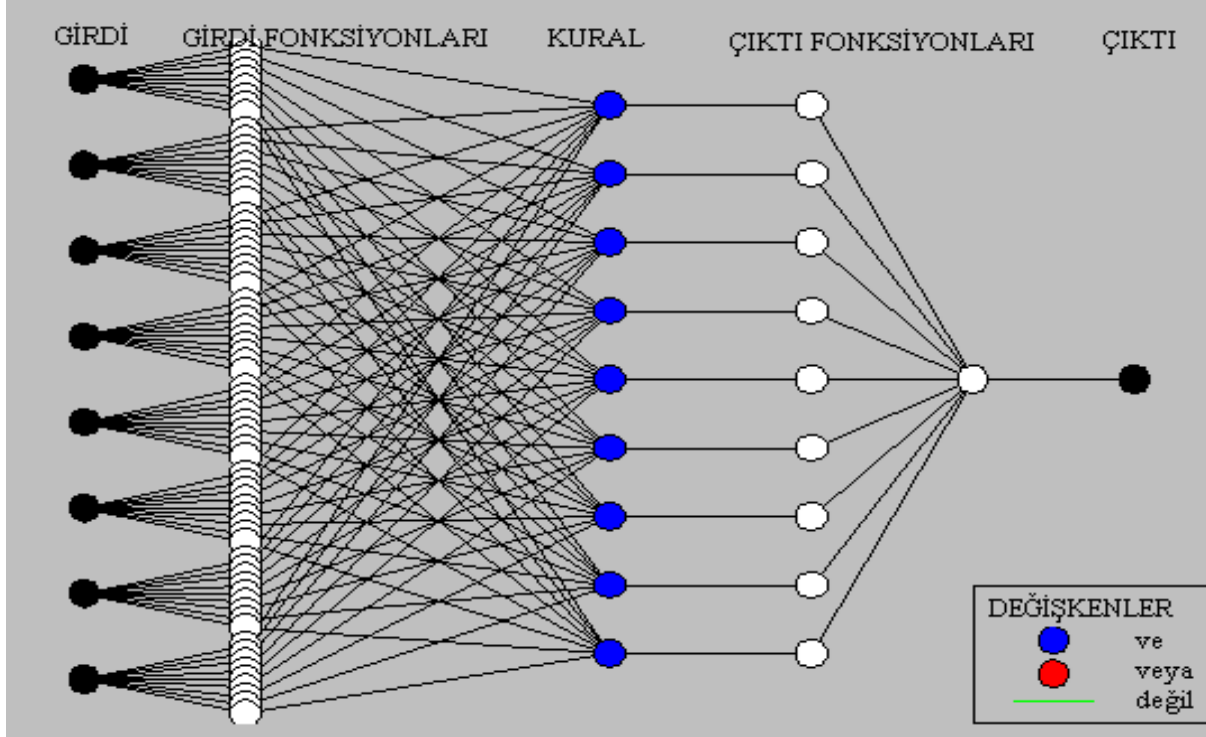
$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} \quad i = 1,2,\dots,n \quad (3)$$

Bu katmanın çıkışları normalize edilmiş olarak adlandırılır.

**4. Katman:** Bu tabakadaki  $i$ -inci düğüm, düğüm fonksiyonunun ile normalize çıkışın çarpılması ile denklem (4)'deki gibi hesaplanmaktadır [8].

$$O_i^4 = \bar{w}_i \cdot f_i = \bar{w}_i \cdot (p_i \cdot x + q_i y + r_i) \quad i = 1,2, \dots, n \quad (4)$$

Burada  $\bar{w}_i$ , 3-üncü katmanın  $i$ -inci düğümün çıkışını ve  $\{p_i, q_i, r_i\}$  ise parametre kümesini göstermektedir. Bu katmandaki parametreler ardıl parametreler olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 1. Projede elde edilen ANFIS mimarisi (The ANFIS model of the Project)

**5. Katman:** Bu katmanın tek sabit düğümündeki  $\Sigma$  etiketi bütün gelen işaretlerin toplamı olan son çıkış olarak Denklem (5)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$O_i^5 = \text{top. çıkış} = \sum_i \bar{w}_i \cdot f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

ANFIS'in temel öğrenme kuralı olarak «backpropagation gradient descent» kullanılmakta ve giriş düğümüne çıkış katmanı tekrar geri verilmekte ve hata işaretleri kendi kendini çağırarak (rekürsif) hesaplanmaktadır (Her düğümün çıkışı ile ilgili kare hata türevidir). Bu öğrenme kuralı tam olarak ortak ileri beslemeli sinir ağlarında kullanılan geri yayılım öğrenme kuralı aynıdır [8].

## 5. DENEYSEL TASARIM VE MODEL PARAMETRELERİ (EXPERIMENTAL DESIGN AND MODEL PARAMETERS)

Önce kullanılan malzemelerin cinsi sabit olmak üzere miktarlarının ve sonuç basınç davranışlarının değişiklik gösterdiği 42 eğitim verisi ve 10 test verisi programa tanıtılmıştır. Verilerin elde edilmesi aşamasında daha önce Reaktif Pudra Betonlarının incelendiği ve deneysel çalışmaların yapıldığı makaleler araştırılmış ve incelenmiştir [12,13,14,15,16,17].

Tasarımında 8 giriş parametresi ve 1 çıkış parametresinin kullanıldığı bu çalışmada sırasıyla PÇ, SD, Kuvars Unu, Kum, Çelik Lif, Süper Akışkanlaştırıcı ve Su miktarları, ayrıca çıkış parametresi olan Basınç Dayanımı parametreleri ayrıntılı olarak Çizelge 2'de verilmiştir.

ANFIS modelinin eğitimi için deneylerden elde edilen 42 veri kullanılırken, her bir beton türünün basınç dayanımını belirlemek için 10 veri, test aşaması için kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan ANFIS modelinde sekiz adet giriş değişkeni (PÇ, SD, Kuvars unu, Kum, Süperakışkanlaştırıcı, Çelik Lif, Su ve Gün)

ve çıkış değişkeni olacaktır RPB'nin basınç dayanımı seçilmiştir. Bu modelde farklı epochlarla farklı öğrenme algoritmaları denendikten sonra en iyi sonucun hibrit öğrenme algoritmasında olduğunu belirlenmiştir. Modelimizde tüm giriş değişkenleri için “gbellmf” üyelik fonksiyonu seçilmiştir çıkış parametresinin üyelik fonksiyonu ise “lineer” olarak seçilmiştir Epoch değerlerinden elde edilen hata oranı ise 0.015 olarak olağan miktarda bulundu. Giriş ve çıkış değişkenlerinin üyelik fonksiyonları Şekil 2'de görülmektedir.

Çizelge 5. Parametreler (Parameters)

		Eğitim ve Test Verileri	
		Min.	Maks.
Giriş Parametreleri	PÇ	657	1000
	Silis Dumanı	0	320
	Kuvars Unu	0	856.16
	Kum	490	1760
	Süperakışkanlaştırıcı	0	100
	Çelik Lif	0	340
	Su	138	300
Çıkış Parametreleri	Hidratasyon Günü	0	28
	Basınç Dayanımı	53.88	178.2

## 6. BULGULAR (RESULTS)

Bu çalışmada, basınç dayanımı değerleri ANFIS ile modellenmiştir. ANFIS modelinin eğitimi için 42 veri kullanılırken, test için 10 veri kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen basınç dayanımları mavi renkli dairelerle, ANFIS değerleri ise kırmızı renkli toplam işareti ile Şekil 3'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere basınç dayanımlar ve ANFIS değerleri birbirlerine paralel şekilde yer almaktadır. Deneysel sonuçlar ile modelden elde edilen test sonuçlarının karşılaştırılmasında ise; belirleme katsayısı ( $R^2$ ), ortalama mutlak yüzde hata

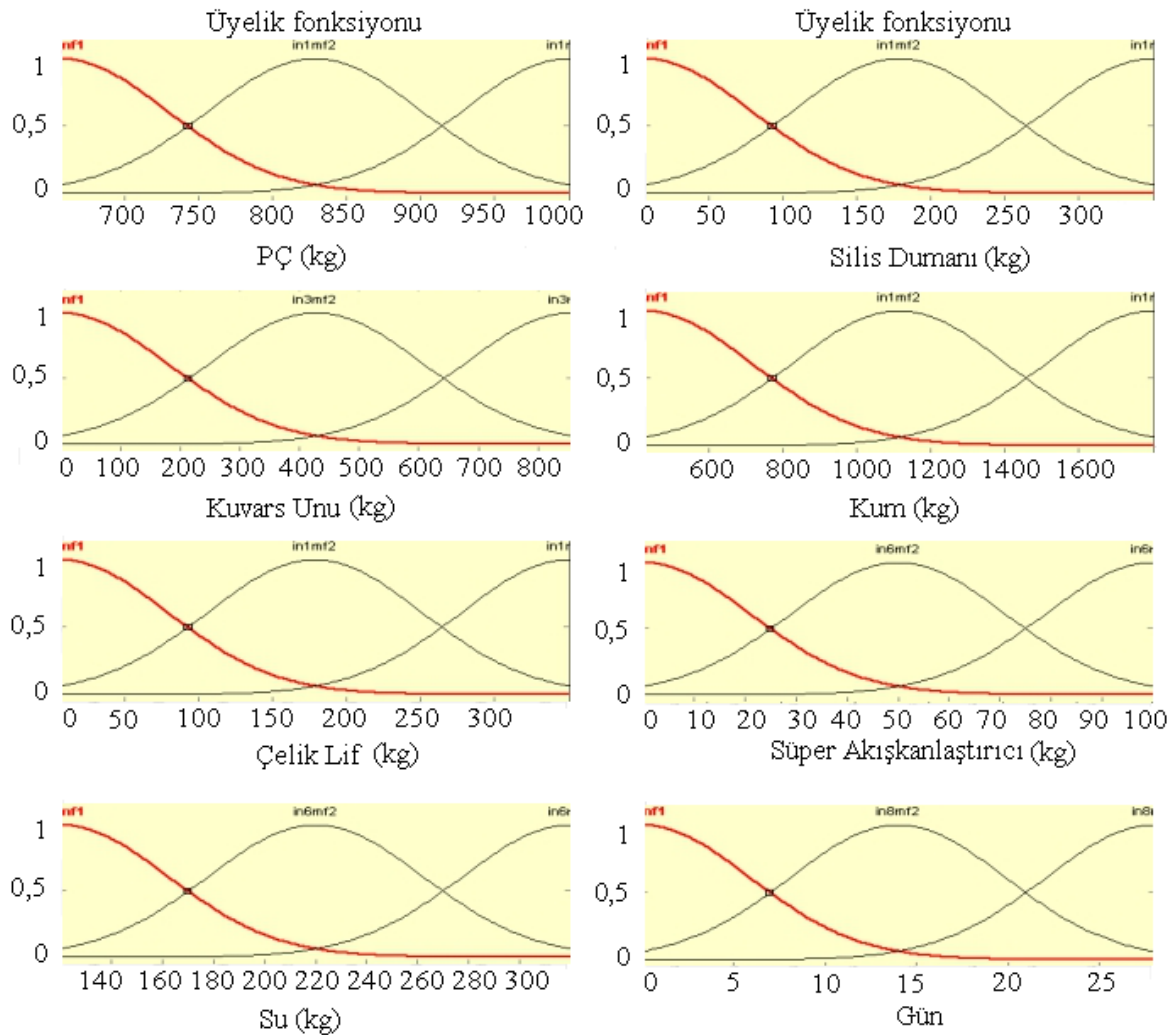
(MAPE) ve karekök ortalama hata (RMS) kriterleri kullanılmış, bu kriterler Denklem (6), (7) ve (8)'le de hesaplanabilir [8]. Burada  $t$  hedef değeri,  $o$  ANFİS çıkış değerini ve  $N$  toplam örneklem sayısını göstermektedir. Elde edilengrafikler Şekil 2 ve 3'te programdan alınarak gösterilmiştir.

$$R^2 = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N o_i^2} \right) \quad (6)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |t_i - o_i|^2} \quad (7)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \left( \frac{t_i - o_i}{o_i} \right) \right| * 100 \quad (8)$$

DeneySEL sonuçlar ile ANFİS modelinden elde edilen test aşamasındaki basınç dayanımları Denklem 6, 7 ve 8 ile istatistiksel karşılaştırma sonuçları hesaplanmıştır. Elde edilen istatistiksel sonuçlar,  $R^2$ , RMS ve MAPE için sırasıyla 0,9909, 0,0277 ve 0,0004 olduğu ve bu sonuçlara göre her iki veri arasında oldukça anlamlı sonuçlar olduğu belirlenmiştir. Belirleme katsayısı ( $R^2$ ) ile elde edilen hata oranı 0,9909 olmaktadır bu değer 1,0 değerine %1 hata ile yakın olması ANFİS sonuçlarının doğru olduğunu göstermektedir. Şekil 4'te Belirleme katsayısı ( $R^2$ ) grafiği gösterilmiştir. Bu nedenle de giriş ve çıkış değişkenleri arasında bir



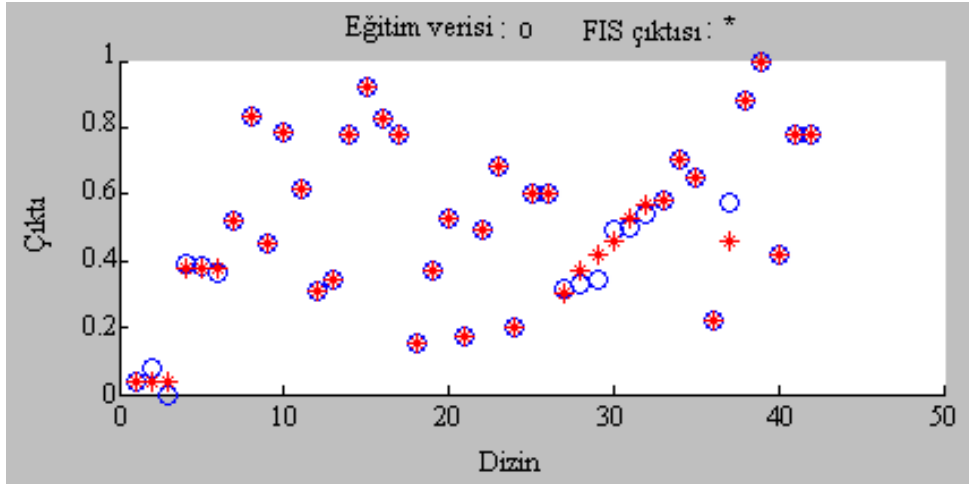
Şekil 2. Giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları (Membership functions of input variables)

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

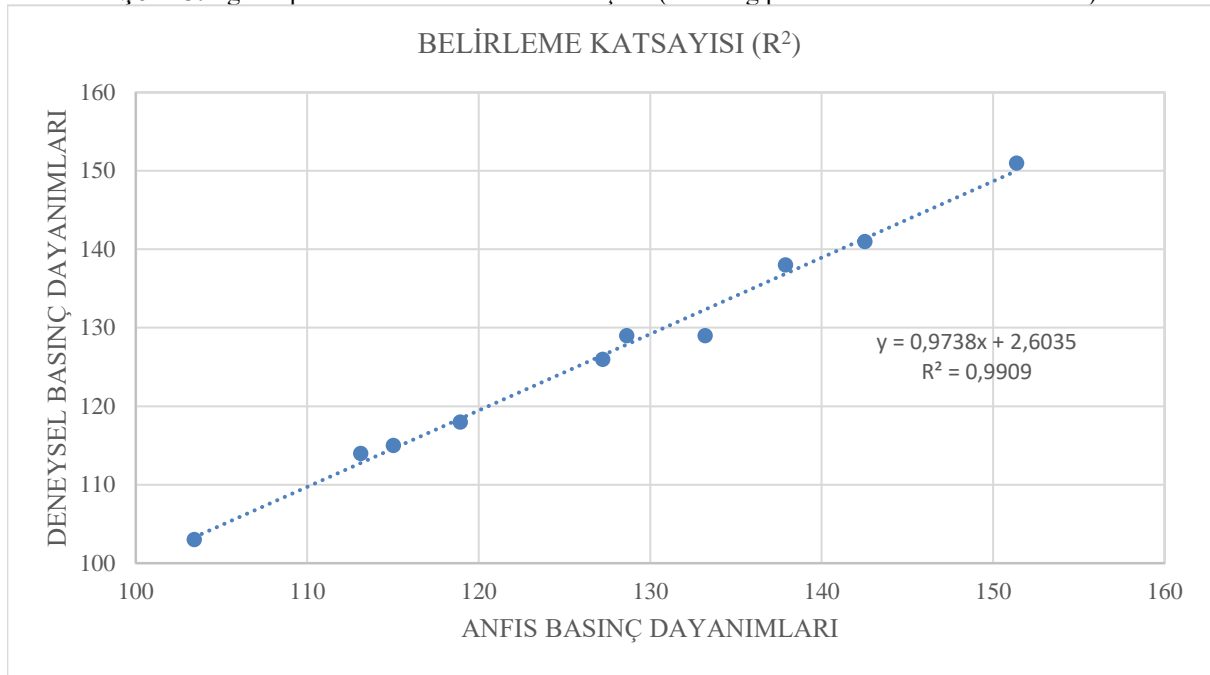
### (CONCLUSION AND SUGGESTIONS)

Yapılan bu çalışmada Reaktif Pudra Betonların basınç dayanımlarını tahmin etmek için geliştirilen ANFİS modeli; hidratasyon günü, Portland çimento, Silis Dumanı, Kuvars Unu, Kum, su ve Süperakışkanlaştırıcı olmak üzere 8 giriş parametresi ve betonun basınç dayanımı olmak üzere 1 çıkış parametresinden oluşmuştur.

uyumun olduğu ve bu ANFİS modelinden oldukça iyi basınç dayanımı tahminleri elde edilebileceği, dolayısı ile geliştirilen bu modelin yararlı ve güçlü bir model olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3. Eğitim parametreleri ve ANFIS sonuçları (Training parameters and ANFIS results)



Şekil 4. Dağılım grafiği (Scatterplot)

Sonuç olarak geliştirilen bu model ile Reaktif Pudra Betonların çok küçük hata ile kısa sürede basınç dayanımlarının tahmininde bulunulabileceği görülmüştür. Ayrıca bu yöntemin yanında yapay sinir ağları (ANN), bulanık mantık gibi uzman sistemler kullanılarak farklı modellerle tahmin edilmesinin yararlı olabileceği düşünülmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Richard P., Cheyrezy M., "Composition of Reactive Powder Concretes", *Cement and Concrete Research*, 25: 1501-1511, (1995).
- [2] Dugat J., Roux N., Bernier G., "Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes", *Materials and Structures*, 29 (188): 233-260, (1996).
- [3] Topçu İ.B., Karakurt C., "Reaktif Pudra Betonu ve Uygulamaları", *Akdeniz İnşaat Haber*, 2: 32-33, (2005).
- [4] Dallaire E., Aitcin P. C., Lachemi M., "High Performance Powder", *Civil Engineering*, 68: 48-51, (1998).
- [5] Taşdemir M. A., Bayramov F., Kocatürk N., Yerlikaya M., "Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler", *Beton 2004 Kongresi*, İstanbul, 24-57, (2004).
- [6] Matte V., Moranville M., "Durability of reactive powder composites: Influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes", *Cement and Concrete Composites*, 21: 1-9, (1999).
- [7] Yeğınobalı A., "Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı", *TÇMB/AR-GE Enstitüsü*, Ankara, (2002).
- [8] Jang J.S.R., "Input selection for ANFIS learning, Fuzzy Systems", *Proceedings of the Fifth IEEE International Conference*, 2: 1493-1499, (1996).
- [9] Ozcan F., Atis C.D., Karahan O., Uncuoglu E., Tanyildizi H., "Comparison of artificial neural network and fuzzy logic models for prediction of long-term compressive

- strength of silica fume concrete”, *Advances in Engineering Software*, 40: 856–863, (2009).
- [10] Sellevold E. J., Nilsen T., “Condensed Silica Fume In Concrete : A world review, Supplementary Cementing Materials for Concrete”, *CANMET, Canadian Government Publishing Center*, 167-229, (1987).
- [11] İpek M., İyiliksever R., Yılmaz K., “Atık Mermer Bulamacının Reaktif Pudra Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi”, *SAÜ Fen Bil Dergisi*, 18(3): 183-192, (2014).
- [12] Topçu İ.B., Karakurt C., “Reaktif Pudra Betonları”, *TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri*, 437(3): 25-30, (2005).
- [13] Bali I., Kushartoma W., Jonathan J., “Effect of In-Situ Curing on Compressive Strength of Reactive Powder Concrete”, *SMAE 2016, MATEC Web of Conferences*, 67, 03013: 1-6, (2016).
- [14] Topçu İ.B., Uygunoğlu T., Mumyalmaz Y.A., “Reaktif Pudra Betonunun Teknik Özellikleri Üzerine Bir İnceleme”, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 1(1): 29-46, (2014).
- [15] Kushartoma W., Christianto D., Suryani J., “Flexural Toughness Reactive Powder Concretes”, *Jurnal Teknik Sipil*, 23(2): 107-112, (2016).
- [16] Rajkumar D., Bage A.A., “Experimental Investigation of Mechanical and Durability properties of Reactive Powder Concrete (RPC)”, *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management and Applied Science (IJLTEMAS)*, 5(7): 30-33, (2016).
- [17] Saravanan J., Poovazhagan S., “Analytical Study on Compressive Strength of Reactive Powder Concrete”, *International Journal of Recent Scientific Research*, 6(5): 3872-3880, (2015).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

# EKG işaretindeki gürültülerin temizlenmesi için IIR tabanlı sayısal filtre tasarımı

## *IIR based digital filter design for denoising the ECG signal*

*Yazar(lar) (Author(s)): Önder YAKUT<sup>1</sup>, Serdar SOLAK<sup>2</sup>, Emine Doğru BOLAT<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-0265-7252*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-1081-1598*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-8290-6812*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Yakut Ö., Solak S. ve Bolat E.D., "EKG işaretindeki gürültülerin temizlenmesi için IIR tabanlı sayısal filtre tasarımı", *Politeknik Dergisi*, 21(1): 173-181, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.386970



# EKG İşaretindeki Gürültülerin Temizlenmesi için IIR Tabanlı Sayısal Filtre Tasarımı

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Önder YAKUT<sup>1</sup>, Serdar SOLAK<sup>2</sup>, Emine Doğru BOLAT<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, Web Teknolojileri Birimi, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Enformatik Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Müh. Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.02.2017 ; Kabul/Accepted : 24.08.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada, EKG (Electrocardiogram) işaretindeki çeşitli gürültüleri ortadan kaldırmak amacıyla IIR (Infinite Impulse Response) tabanlı farklı sayısal filtreler kullanılmış ve bu filtrelerin başarımları analizleri karşılaştırılmıştır. EKG işareti kalbin işlevlerini yerine getirmesi sonucunda oluşan bir sinyaldir. Elektrofizyolojik bilgi taşıyan bu işaret, kalbe ait hastalıkların teşhis edilmesi ya da kalbin durumunun izlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan EKG işaretleri MIT-BIH aritmi veri tabanı kayıtlarından alınmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, IIR tabanlı Butterworth, Chebyshev Tür 1, Chebyshev Tür 2 ve Elliptic sayısal filtreleri kullanarak EKG işaretindeki gürültüleri gidermek amaçlanmıştır. Gürültü çeşitlerine göre filtreler yapılandırılarak başarımları analizleri yapılmıştır. Başarımları yüksek olan filtreler seçilmiş EKG işaretindeki R tepesi ve QRS algılayıcı algoritmalarının ön işleme sürecinde kullanılacak bir sistem önerilmiştir. Önerilen sistemin tatmin edici nitelikte bir başarımlar sağladığı görülmüştür. Başarımlar analizinde istatistiksel parametreler olarak, Ortalama Karesel Hata (Mean Square Error, MSE), İşaret Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio, SNR) ve Tepe Sinyal Gürültü Oranı (Peak to Signal Noise Ratio, PSNR) ölçütleri kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrokardiyogram(EKG), EKG gürültü arındırma, IIR tabanlı sayısal filtre, güç hattı girişimi, taban hattı kayması, kas (EMG) gürültüsü.

## IIR Based Digital Filter Design for Denoising the ECG Signal

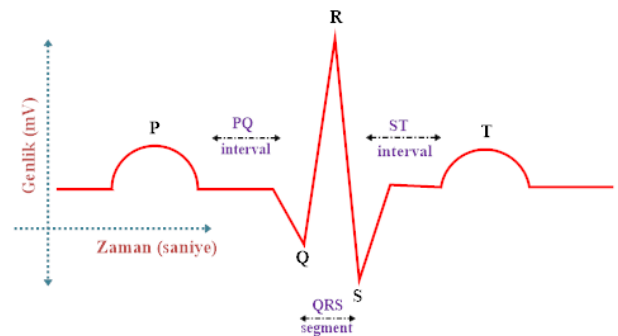
### ABSTRACT

In this study, several IIR based filters are used for eliminating various noises from the Electrocardiogram (ECG) signal and the performance analysis of these filters are compared with each other. ECG is a signal resulted from the heart's functions. The ECG signal having electrophysiological information is used for the diagnosis of the heart diseases or monitoring the condition of the heart. The ECG data utilized in this study is taken from the MIT-BIH arrhythmia database recordings. It is aimed to remove the noises from the ECG signal employing the IIR based Butterworth, Chebyshev Type 1, Chebyshev Type 2 and Elliptic digital filters. The filters are configured depending on the noise types and the performance analysis of the filters is realized. A system is proposed selecting the filters having high performances and using them in the pre-processing stage of the R and QRS detection algorithm. And it is observed that the proposed system provides a satisfactory performance. The statistical parameters used for the performance analysis are Mean Square Error (MSE), Signal to Noise Ratio (SNR), Peak to Signal Noise Ratio (PSNR).

**Keywords:** Electrocardiogram (ECG), ECG filtering, IIR based digital filter, power line interference, baseline wander, muscle (EMG) noise.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

EKG, kalbin fonksiyonlarını yerine getirirken oluşturduğu elektriksel kökenli bir elektrofizyolojik işarettir. EKG işaretini doğru bir şekilde analiz etmek amacıyla bazı işlemlerden geçirmek gerekmektedir. Bu amaçla EKG işareti, zaman ve frekans uzayında analiz edilebilmektedir.



Şekil 1. EKG işaretine ait dalga şekli (The ECG waveform)[1]

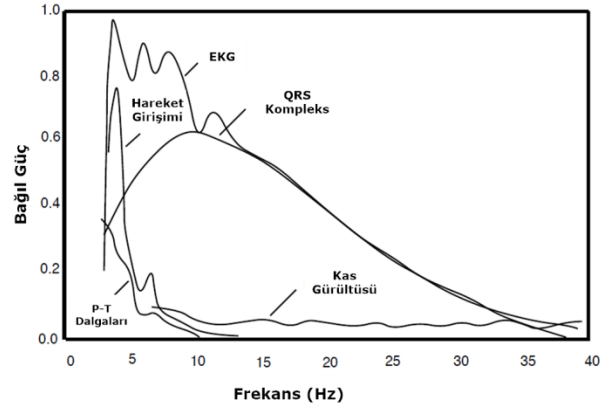
\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : ebolat@gmail.com

Şekil 1'de, EKG işaretini oluşturan P, QRS kompleksi ve T bileşenleri ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir. Şekil 1'de EKG işaretinin zaman uzayındaki dalga şekli görülmektedir.

Ayrıca, EKG işaretinin frekans uzayı özellikleri de mevcuttur. Şekil 3'de EKG işaretinin güç spektral yoğunluğu (Power Spectral Density, PSD) gösterilmektedir. Tanlayıcı EKG işaretinin 0.5-100 Hz [2] aralığında değişebilir frekansta ve 0.02-5 mV aralığında değişen genliğe sahip bir yapısı mevcuttur. İnsan vücudundan elde edilen biyoelektrik kökenli işaretler düşük genlikli bir yapıya (mili ya da mikro volt seviyesinde) sahiptir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, Aboutabikh ve arkadaşları yaptıkları çalışmada FPGA çip setleri kullanılarak tasarlanan sayısal FIR notch filtre kullanarak 50 Hz şebeke frekansını elimine edilmesini önermişlerdir[3]. Limaye ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, EKG işaretindeki farklı gürültü kaynakları ve bunları azaltmak için çeşitli yöntemleri kısaca incelemişlerdir[4]. Patne ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, EKG görüntüleme sistemi için MATLAB tabanlı gürültü giderme uygulaması önermişlerdir[5]. Ahmad ve arkadaşları, EKG işaretindeki 50 Hz güç hattı gürültüsünü elimine etmek amacıyla pencere tabanlı Finite Impulse Response (FIR) filtre algoritması kullanmışlardır[6]. Hamiane ve arkadaşları, ham EKG işaretlerini Butterworth filtresini kullanarak iki tür anormallik algılama algoritması sunmuşlardır[7]. Sharma ve arkadaşları FIR ve IIR tabanlı sayısal filtreler ile EKG işaretindeki gürültünün giderilmesini gerçekleştiren bir çalışma yapmışlardır [8]. Urganlar ve arkadaşları, Medyan ve FIR filtre kullanarak EKG işaretindeki gürültüyü gideren ön işleme süreci önermişlerdir[9]. Batial ve arkadaşları, EKG işareti işleme amacıyla çeşitli pencere teknikleri kullanarak FIR filtre tabanlı çalışma önermişlerdir[10]. Georgieva-Tsaneva ve arkadaşları, EKG işaretinden gürültü giderme amacıyla dalgacık dönüşümü kullanarak adaptif eşikleme yöntemi önermişlerdir[11]. Mbachu ve arkadaşları EKG işaretindeki elektrik hattı gürültüsünü azaltmak amacıyla Hamming penceresi ile tasarlanmış sayısal FIR filtre tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir[12]. Joshi ve arkadaşları EKG işaretindeki gürültüleri kaldırmak amacıyla çeşitli yaklaşımlar kullanmış ve sonuçları incelemişlerdir[13]. Joshi ve arkadaşları EKG işaretini bozan çeşitli gürültü kaynaklarını tespit etmek ve etkilerini azaltmak amacıyla çeşitli filtreleme teknikleri kullanan bir yaklaşım sunmuşlardır[14]. Mbachu ve arkadaşları, EKG işaretinden gürültüleri kaldırmak amacıyla Kaiser penceresi içeren sayısal FIR filtre tasarlamışlardır[15].

Şekil 2'de QRS kompleksi, P ve T dalgalarına ait frekansa göre güç spektrumu çizdirilmiştir. Ayrıca burada, kas (elektromiyogram, EMG) gürültüsü ve harekete dayalı girişimlere ait gürültü spektrumu da yer almaktadır. EKG işaretine karışmış gürültünün etkisi frekans uzayına geçildiği zaman gözlemlenebilmektedir.



Şekil 2. QRS kompleksi, P ve T dalgaları, kas (EMG) gürültüsü ve hareket girişimlerine ait güç spektrumu (Power spectra of QRS complex, P and T waves, muscle (EMG) noise and motion artifacts) [16]

Bu çalışmada MIT-BIH aritmi veri tabanına ait 100, 103, 105 ve 115 numaralı EKG kayıtları kullanılmıştır. MIT-BIH aritmi veri tabanı, 1975-1979 yılları arasında BIH aritmi laboratuvarları tarafından incelenen 47 hastadan toplanan 48 EKG kaydını içermektedir. Her bir kayıt, yarım saatlik, 2 kanallı EKG işaretinden oluşmaktadır. Kayıtlar 360 Hz frekansında, 11 bit çözünürlükte ve 10 mV aralığında sayısallaştırılmıştır [17].

EKG sinyalinden gürültü gidermek amacıyla filtre uygulandığında, EKG işareti zaman ve frekans uzayında değişimlere uğramaktadır. Bu çalışmada, EKG işaretinden gürültü gidermek amacıyla IIR tabanlı sayısal filtreler tasarlanmıştır. Tasarlanan filtrelerin, EKG sinyali üzerindeki etkisini göstermek amacıyla, zaman ve frekans uzayına ait grafikler çizdirilerek insanlar/kullanıcılar tarafından algılanabilecek hale getirilmiştir. Oluşturulan filtreler, EKG işaretine uygulanarak filtrenin MSE, SNR, PSNR gibi istatistiksel değerleri hesaplanarak başarımları analiz yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda her bir gürültü çeşidi için yüksek başarımlı gösteren filtre türleri belirlenmiştir. Belirlenen filtre türleri kullanılarak EKG işaretinden gürültü arındırma amacıyla bir sistem önerilmiştir.

## 2. EKG İŞARETİNDE KULLANILAN FİLTRELER (FILTERS USED FOR THE ECG SIGNAL)

EKG işareti kayıt edilirken, çevresel etmenlerden dolayı kaynağı bilinen ya da bilinmeyen gürültü girişimleri olmaktadır. AC güç kaynakları, RF (radio frequency) işaretleri, kalp pili (peace maker) gibi implantlar, fizyolojik kökenli işaretler ve hastanın istemli ya da istemsiz hareketi etmesi veya elektrotta temas problemi oluşması nedeniyle bir çok çevresel etmenin EKG işareti üzerinde etkisi olmaktadır.

- Taban hattı kayması/gezinmesi (Baseline wander), 1 Hz altındaki düşük frekanslı gürültülerdir.
- Güç hattı girişimi (Power line interference), 50/60 Hz şebeke frekanslı kaynaklı gürültülerdir.

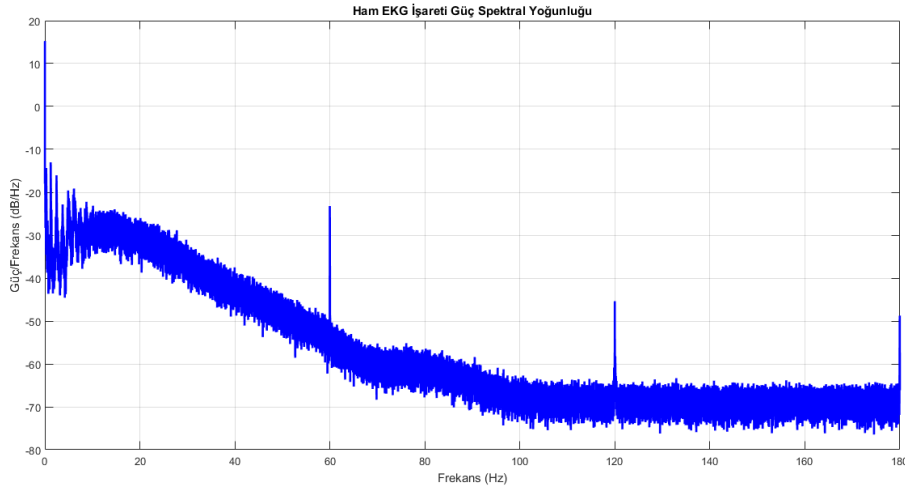
- Kas (EMG noise) gürültüsü, fizyolojik kökenli sinyallerdir. Belirlenerek kaldırılması çok zor olan işaretlerdir. Filtreler yardımıyla yazılımsal olarak etkilerinin azaltılması sağlanmaktadır. 100 Hz üstü yüksek frekanslı gürültülerdir.
- Kaynağı bilinmeyen girişimler, RF gürültüsü gibi çevredeki cihazlardan kaynaklanan gürültüler.

Şekil 3'te EKG işaretinin normal frekans aralığına bakıldığında, 100 Hz ve altında çok yoğun ve önemli bilgi içerdiği, 100 Hz üstünde ise çok sınırlı bilgi içerdiği gözlemlenmektedir. Bu nedenle, EKG işaretinde 0-100 Hz aralığı, teşhise dayalı en yoğun ve geniş bilgi içerdiği için filtrelerde en iyi dengeyi elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca, EKG işaretinin güç spektral yoğunluğunun çok büyük oranının 0-35 Hz frekans aralığında yoğunlaştığı Şekil 3'te görülmektedir. Bu durum, Şekil 2'deki grafikte de doğrulanmaktadır. Şekil 2'de bu geçiş bandı aralığında QRS kompleksinin enerjisinin en üst düzeye çıktığı açıkça gözlemlenmektedir.

### 3. BENZETİM ÇALIŞMALARI (SIMULATION STUDIES)

Bu çalışmada, daha az işlem yükü gereksinimi olan sayısal çıkışlı filtre yapılarında kullanılan Sonsuz Dürtü Yanıtlı (Infinite Impulse Response, IIR) filtre kullanılmaktadır. IIR tabanlı sayısal filtre türleri olarak; Butterworth, Chebyshev Tür 1, Chebyshev Tür 2 ve Elliptic Filtreler alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren ve bant durduran özellikte yapılandırılarak filtreleme işlevlerini yerine getirmektedir.

Yapılan benzetim çalışmalarında, yukarıdaki sayısal filtreler kullanılarak EKG işaretindeki gürültüler giderilmeye çalışılacaktır. Yapılan deneysel çalışmalarda, IIR tabanlı sayısal filtreler Matlab R2015b (The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA) yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Sayısal filtrelerin başarımları sonuçları aşağıda denklemleri ve açıklamaları verilen ölçütlere göre hesaplanarak analiz edilecektir. Denklemlerde kullanılan  $x(n)$  ham/gürültülü EKG



Şekil 3. EKG işaretine ait güç spektral yoğunluğu (PSD) grafiği, MIT-BIH aritmi veri tabanı 100 numaralı kayıt (The spectral power density graph of the ECG signal, MIT-BIH arrhythmia database record 100)[17]

#### 2.1. Alçak Geçiren Filtre (Low Pass Filter)

Kesim frekansının altındaki işaret frekanslarına izin veren ve kesim frekansının üstündeki frekansları geçirmeyen filtre türüdür. Genellikle, işareti pürüzsüz hale getirmek için kullanılmaktadır.

#### 2.2. Yüksek Geçiren Filtre (High Pass Filter)

Kesim frekansından daha yüksek frekansların geçmesine izin veren ve düşük frekansları geçirmeyen filtre türüdür. Genellikle, işaretin taban hattını dengelemek için kullanılırlar. Bu sayede, işaretin DC bileşenleri elimine edilmiş olmaktadır.

#### 2.3. Bant Durduran Filtre (Band Stop Filter)

Belli bir frekans aralığını engelleyerek geçmesine izin vermeyen ve bu aralığın dışında kalan frekans bölgelerini geçiren filtre türüdür. Genellikle, işarete belirli bir frekansı, şebeke gürültüsü gibi, kaldırmak amacıyla kullanılmaktadır.

işaretini,  $y(n)$  ise filtrelenmiş/gürültüden arındırılmış EKG işaretini temsil etmektedir. Denklemde kullanılan  $n$  indisi, EKG işaretindeki her bir örneği,  $N$  ise EKG işaretindeki toplam örnek sayısını belirtmektedir.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n) - y(n)]^2 \quad (1) \quad \text{Ortalama}$$

Karesel Hata (Mean Square Error, MSE), ham EKG sinyali ile filtrelenmiş EKG sinyali arasındaki hata oranını belirlemek amacıyla kullanılan bir ölçüttür. MSE değeri, denklem (1)'deki gibi hesaplanmaktadır [11]. MSE değeri sifıra yaklaştıkça, oluşturulan filtrenin hata oranı azalmaktadır.

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_{n=1}^N [x(n)]^2}{\sum_{n=1}^N [x(n) - y(n)]^2} \right) \quad (2)$$

İşaret Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio, SNR), ham EKG sinyaline ait güç ile filtrelenerek çıkartılan gürültünün gücüne oranı olarak hesaplanmaktadır. SNR değeri denklem (2)'de gösterilmektedir [11]. SNR değeri yükseldikçe işaretteki gürültü seviyesi yüksek derecede azaltılmakta ve işaretin taşıdığı bilginin güvenilirliği ve kalitesi artmaktadır.

$$PSNR_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{R^2}{MSE} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{[\max(x(n))]^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n) - y(n)]^2} \right) \quad (3)$$

Tepe Sinyal Gürültü Oranı (Peak to Signal Noise Ratio, PSNR), tepe hatasının bir ölçüsüdür ve hata ölçütü olarak başarımlı analizlerinde kullanılmaktadır. PSNR değeri yükseldikçe, filtrelenmiş sinyalin kalitesi artmaktadır. Genellikle SNR gibi PSNR değeri de Logaritmik (dB) ölçeklidir ve denklem (3)'de görüldüğü gibi hesaplanmaktadır [18]. Denklemdeki MSE, ortalama karesel hatayı temsil etmekte, R değeri ise giriş işaretine ait maximum dalgalanma aralığı olarak ifade edilmektedir.

Filtreleme işlemi sonucu, ECG işaretinde meydana gelen

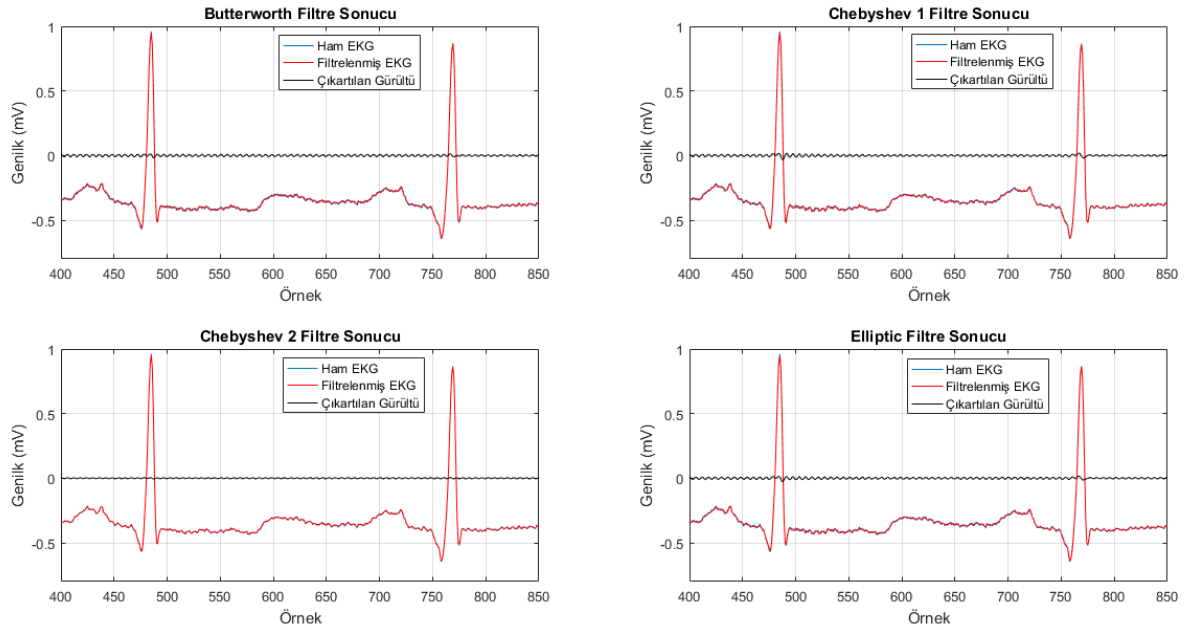
Aynı şekilde, filtrenin EKG işareti üzerindeki etkisini frekans uzayında gözlemleyebilmek amacıyla; ham EKG işareti ile filtrelenmiş EKG işaretini Welch's yöntemi kullanılarak güç spektral yoğunluğu grafikleri çizdirilmektedir. Bu grafikler aracılığıyla, uygulanan filtrelerin hangi frekansta etkili olduğu grafiksel olarak gösterilmektedir.

Welch's yöntemi, farklı frekanslara sahip bir işaretin gücünü tahmin etmek amacıyla kullanılmaktadır. Spektral yoğunluk, tahmini bir yaklaşım kullanılarak yapılmaktadır ve işaret zaman uzayından frekans uzayına dönüştürülerek periodogram spektrum tahmini kavramına dayanmaktadır. Welch's yöntemi, frekans çözünürlüğünü düşürerek güç spektrumundaki gürültüyü azalttığı için bazı spektrum tahmin yöntemlerinden daha iyi sonuç vermektedir [19].

### 3.1.EKG İşaretindeki Güç Hattı Girişimini Filtreleme İşlemi

(Filtering the Power Line Interference of the ECG Signal)

Güç hattı girişimleri, 50/60 Hz şebeke frekansına bağlı

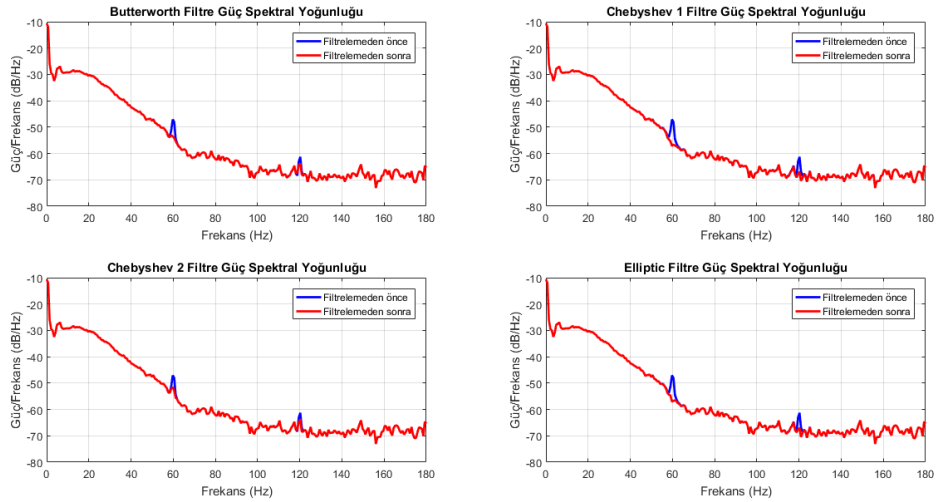


Şekil 4. Güç Hattı Girişimi için tasarlanan sayısal filtrelerin etkisini gösteren grafikler (The graphs showing the effects of the designed digital filter for the power line interference)

değişimleri görebilmek amacıyla zaman ve frekans uzayı grafikleri çizdirilmiştir. Filtrenin EKG işaretindeki zaman uzayı etkisini görebilmek amacıyla;

ham EKG işareti ile filtre sonucu elde edilen EKG işareti arasındaki fark alınarak, çıkartılan gürültü hesaplanmaktadır. Daha sonra, bu üç işaret aynı grafikte çizdirilerek EKG işaretindeki değişim, zaman uzayında gösterilmektedir.

olarak temel frekans ve tam katlarında ek yükselmeler ve harmonikler meydana getirmektedir. Şekil 3 ve 5'te güç spektrumu yoğunluğu verilen EKG işareti ait grafikte şebeke frekansı ve tam katlarındaki (60 Hz ve 120 Hz) girişimlerin tepeler oluşturduğu gözlemlenebilmektedir.



Şekil 5. Güç hattı girişimi için tasarlanan sayısal filtrelerin güç spektral yoğunluğu grafikleri (The power spectral density graphs of the designed digital filters for the power line interference)

Yapılan çalışmada, temel frekans ve tam katlarında bant durdurucu filtre tasarlayarak, güç hattı girişimi bastırılmaktadır. Bant durdurucu aralığı 59.9 – 60.1 Hz, işaretin örnekleme frekansı 360 Hz, filtre derecesi 5 olan özelliklere sahip bant durdurucu filtre geliştirilmiştir. Geliştirilen filtreler ile MIT-BIH aritmi veri tabanına ait 100 numaralı kayıt filtrelenmiştir. Filtreleme işlemi sonucu, EKG işareti üzerindeki değişimler Şekil 4 ve 5'te net bir şekilde gösterilmektedir.

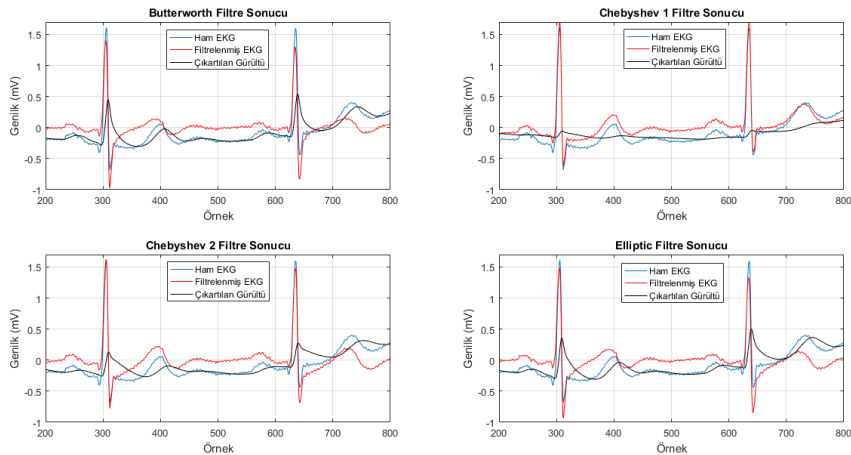
Çizelge 1. Güç hattı girişimini elimine etmek için tasarlanan filtrelerin başarımları (The performance results of the designed filters for eliminating the power line interference)

Filtre	MSE	SNR (dB)	PSNR (dB)
Butterworth	0.000044	34,775	43,112
Chebyshev Tür 1	0.000049	34,315	42,623
<b>Chebyshev Tür 2</b>	<b>0.000012</b>	<b>40,352</b>	<b>48,741</b>
Elliptic	0.000044	34,813	43,134

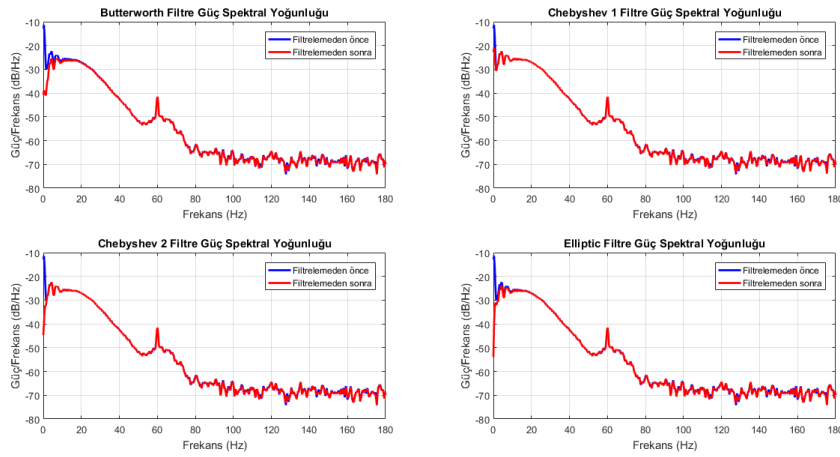
EKG işaretindeki güç hattı girişimini filtreleme işlemi sonucu IIR tabanlı sayısal filtreler için başarımları Çizelge 1'de listelenmiştir. Çizelge 1'de filtreler için başarımları karşılaştırılabilmektedir. Güç hattı girişimini filtreleme işlemi başarımları en iyi olan, MSE değeri 0,000012, SNR değeri 40,352 ve PSNR değeri 48,741 ile Chebyshev Tür 2 filtre olarak gözlemlenmektedir.

### 3.2. EKG İşaretindeki Taban Hattı Kaymasının Filtrelenmesi (Filtering the Baseline Wander of the ECG Signal)

EKG işareti kaydedilirken, işaret kaynağı olan kalp ile EKG elektrodu arasında hastanın nefes alıp vermesi, hareket etmesi ve elektrodun vücut yüzeyine teması sonucu oluşan değişimler taban hattı kaymasını oluşturmaktadır. Düşük frekanslı gürültü olarak taban hattı kayması, 1 Hz'in altındaki frekanslarda meydana gelmektedir. Yapılan çalışmada, EKG sinyalindeki taban hattı kaymasını ortadan kaldırmak için sayısal filtreler



Şekil 6. Taban hattı kayması için tasarlanan sayısal filtrelerin etkisini gösteren grafikler (The graphs showing the effects of the designed digital filter for the baseline wander)



Şekil 7. Taban hattı kayması için tasarlanan sayısal filtrelerin güç spektral yoğunluğu grafikler (The power spectral density graphs of the designed digital filters for the baseline wander)

tasarlanarak etkileri incelenmiştir. Bant geçirme aralığı 1 Hz üstü, işaretin örnekleme frekansı 360 Hz, filtre derecesi 3 olan özelliklere sahip yüksek geçiren bir filtre geliştirilmiştir. Geliştirilen filtreler ile MIT-BIH aritmi veri tabanına ait 103 nolu kayıt kullanılarak filtreleme yapılmıştır. Filtreleme işlemi sonucu, EKG işareti üzerindeki değişimler Şekil 6 ve 7’de net bir şekilde gösterilmiştir.

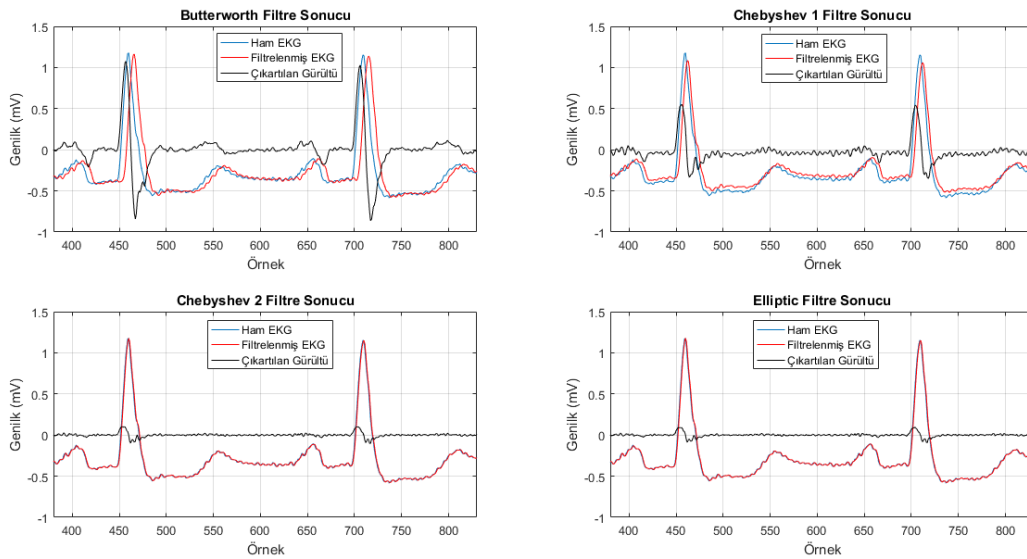
**Çizelge 2.** Taban hattı kaymasını elimine etmek için tasarlanan filtreler için başarımları (The performance results of the designed filters for eliminating the baseline wander)

Filtre	MSE	SNR (dB)	PSNR(dB)
Butterworth	0,060717	-1,357	15,422
<b>Chebyshev Tür 1</b>	<b>0,042266</b>	<b>1,707</b>	<b>18,389</b>
Chebyshev Tür 2	0,054302	0,206	17,27
Elliptic	0,061652	-0,868	15,825

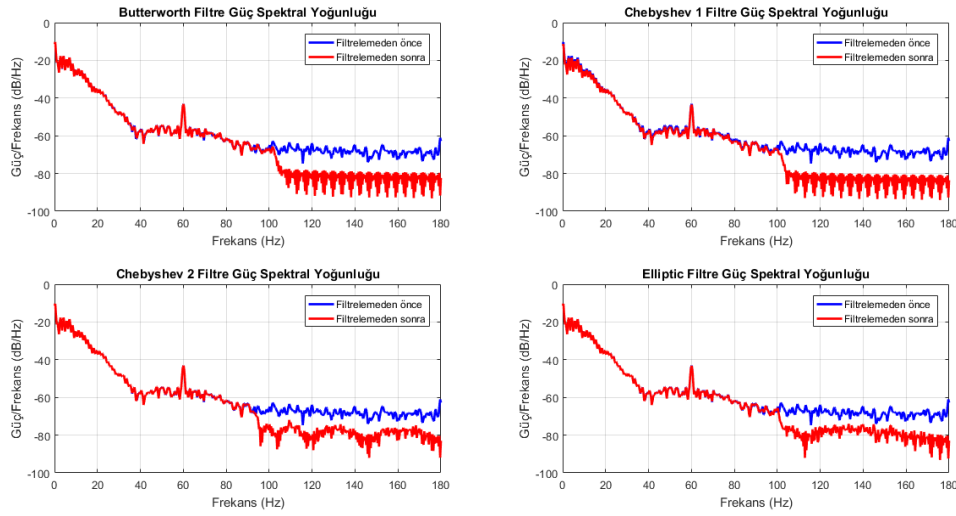
EKG işaretindeki taban hattı kayması filtreleme işlemi sonucu Çizelge 2’deki gibi IIR tabanlı sayısal filtreler için başarımları detaylı olarak listelenmiştir. Çizelge 2’deki sonuçlar incelendiğinde, filtreler için sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılabilmektedir. Taban hattı kayması filtreleme işlemi başarımları en iyi olan, MSE değeri 0,04226, SNR değeri 1,707 ve PSNR değeri 18,389 olan Chebyshev Tür 1 filtre olduğu gözlemlenmektedir.

### 3.3. EKG İşaretindeki Kas (EMG) Gürültüsünün Filtrelenmesi (Filtering the Muscle (EMG) Noise on the ECG Signal)

Yüksek frekanslı gürültü olarak kas/EMG gürültüsü EKG kaydı yapılırken hastanın hareket etmesi ile iskelet kaslarının kasılması sonucu oluşmaktadır. Bu etki, EKG



Şekil 8. Kas (EMG) gürültüsü için tasarlanan sayısal filtrelerin etkisini gösteren grafikler (The graphs showing the effects of the designed digital filter for muscle (EMG) noise)



Şekil 9. Kas (EMG) gürültüsü için tasarlanan sayısal filtrelerin güç spektral yoğunluğu grafikleri (The power spectral density graphs of the designed digital filters for the muscle (EMG) noise)

işaretinde istenmeyen değişikliklere neden olmakta ve EKG sinyalinde bozulmalar meydana gelmektedir. EMG gürültüsünün frekans içeriği, 100 Hz den yüksek frekanslarda etkili olduğu bilinmektedir. Yapılan çalışmada, 100 Hz'in üstünü geçirmeyen, alçak frekansları geçiren bir filtre tasarlayarak, EMG gürültüsü giderilmeye çalışılmaktadır. Bant geçirme aralığı 100 Hz altı, işaretin örnekleme frekansı 360 Hz, filtre derecesi 9 olan özelliklere sahip alçak geçiren bir filtre geliştirilmiştir. Geliştirilen filtreler ile MIT-BIH aritmi veri tabanına ait 105 numaralı kayıt filtrelenmiştir. Filtreleme işlemi sonucu, EKG işareti üzerindeki değişimler Şekil 8 ve 9'da net bir şekilde gösterilmiştir.

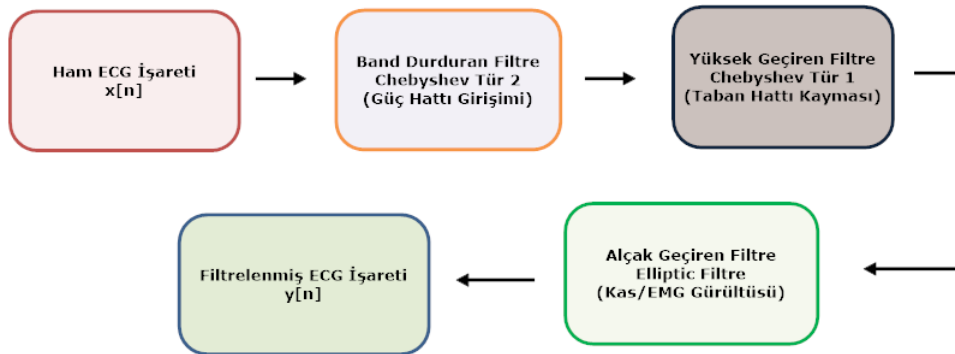
Çizelge 3. Kas (EMG) gürültüsünü elimine etmek için tasarlanan filtreler için başarımları (The performance results of the designed filters for eliminating the muscle (EMG) noise)

Filtre	MSE	SNR (dB)	PSNR (dB)
Butterworth	0.046583	5,135	15,324
Chebyshev 1	0.012370	9,984	20,509
Chebyshev 2	0.000545	24,45	34,742
<b>Elliptic</b>	<b>0.000448</b>	<b>25,306</b>	<b>35,598</b>

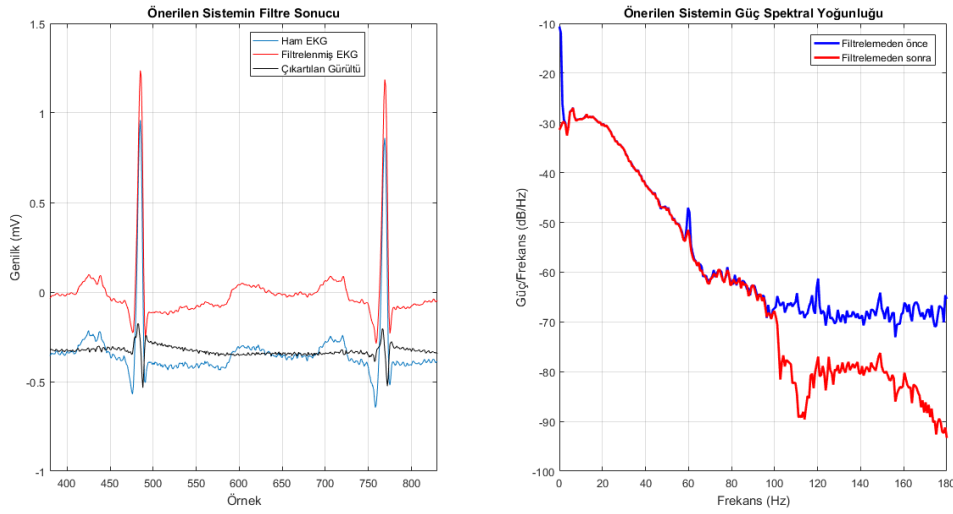
EKG işaretindeki kas (EMG) gürültüsü filtreleme işlemi sonucu IIR tabanlı sayısal filtreler için başarımları Çizelge 3'te listelenmiştir. Çizelge 3'teki sonuçlar incelendiğinde, filtreler için sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılabilmektedir. Taban hattı kayması filtreleme işlemi başarımları en iyi olan, MSE değeri 0,000448, SNR değeri 25,306 ve PSNR değeri 35,598 olan Elliptic filtre olduğu gözlemlenmektedir.

### 3.4. EKG İşaretinin Gürültülerden Arındırılması için Önerilen Sistem (The Proposed System for Denoising the ECG Signal)

Yukarıda yapılan benzetim çalışmalarında EKG işaretindeki çeşitli gürültülerin elimine edilmesi amacıyla IIR tabanlı sayısal filtreler incelenmiştir. Yapılan çalışmalara ait başarımları analiz edilerek, gürültü çeşitlerine göre en başarılı filtreler karşılaştırmalı olarak belirlenmiştir. Güç hattı girişimini en başarılı şekilde elimine eden filtre olarak Chebyshev Tür 2 filtre seçilmiştir. Taban hattı kaymasını en başarılı şekilde



Şekil 10. Önerilen sistemin blok diyagramı (The block diagram of the proposed system)



**Şekil 11.** Önerilen sistemin EKG işareti üzerindeki etkisini gösteren filtre sonucu ve güç spektral yoğunluğu grafikleri (The obtained graphs of the ECG signal showing the effects of the proposed system and the power spectral density)

elimine eden filtre olarak Chebyshev Tür 1 filtre seçilmiştir. Kas (EMG) gürültüsünü en başarılı şekilde elimine eden filtre olarak Elliptic filtre seçilmiştir

Başarımı yüksek filtreler kullanılarak EKG işaretindeki gürültüleri elimine eden IIR tabanlı sayısal filtreler içeren bir sistem önerilmiştir. Önerilen sistemin blok diyagramı Şekil 10'da verilmiştir. Her bir filtre, benzetim çalışmaları sonucu elde edilen özellikleri kullanılarak ilgili blokta kullanılmaktadır. Ham EKG sinyali sırayla ilgili aşamalarda bloklerden geçerek filtrelenmekte ve sonuçta gürültülerden arındırılmış, filtrelenmiş EKG işareti elde edilmektedir.

Önerilen sistem ile MIT-BIH aritmi veri tabanına ait 115 numaralı kayıt kullanılarak filtreleme işlemi yapılmıştır. Önerilen sistemin, hesaplanan başarımlar değerleri sırasıyla; MSE değeri 0,096991, SNR değeri -5,137 ve PSNR değeri 11,996 olarak elde edilmiştir. Filtreleme işlemi sonucu, EKG işareti üzerindeki değişimler Şekil 11'de net bir şekilde görülmektedir

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan çalışmada, EKG işaretindeki önemli gürültüleri gidermek amacıyla IIR tabanlı sayısal filtreler tasarlanmıştır. Bu filtreler, gürültü çeşidine ait özelliklere göre yapılandırılarak kendi aralarında başarımlar ölçütlerine göre analiz edilmiştir. Bu analiz sonucu, benzetim başarımlar yüksek filtreler seçilerek EKG işaretini gürültülerden arındıran bir sistem önerilmiştir. Önerilen sistemde, benzetim başarımlar yüksek olan, bant durduran filtre olarak Chebyshev Tür 2, yüksek geçiren filtre olarak Chebyshev Tür 1 ve alçak geçiren filtre olarak Elliptic filtre kullanılmıştır. Önerilen sisteme ait başarımlar ölçütü değerleri sırasıyla; MSE 0,096991, SNR -5,137 ve PSNR 11,996 olarak hesaplanmıştır. EKG işaretindeki gürültüleri gidermek

amacıyla başarımlar analizi değerlendirildiğinde tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada, MIT-BIH aritmi veri tabanına ait EKG kayıtları kullanılmıştır. Önerilen sistem, gerçek zamanlı EKG işareti izleme/görüntüleme amacıyla geliştirilen QRS algılama algoritmalarının ön işleme aşamasında EKG işaretindeki gürültüleri gidermek amacıyla kullanılabilir bir yapıdadır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yakut O., Solak S. and Bolat E.D., "Measuring EKG signal using e-health sensor platform", *International Conference on Chemistry, Biomedical and Environment Engineering*, Antalya, 65-69, (2014).
- [2] Clifford G.D., Azuaje F. and McSharry P., "ECG Statistics, Noise, Artifacts and Missing Data", Artech House Inc., Norwood MA USA, (2006).
- [3] Aboutabikh K., Haidar I. and Aboukerdah N., "Design and implementation of a digital FIR notch filter for the ECG signals using FPGA", *IJARCCCE*, 5: 452-456, (2016).
- [4] Limaye H., Deshmukh V. V., "ECG noise sources and various noise removal techniques: a survey", *IJAIEEM*, 5: 86-92, (2016).
- [5] Patne S.L., Khope S.R., "ECG denoising and disease detection", *IJESCC*, 6: 7361-7363, (2016).
- [6] Ahmad I., Ansari F. and Dey U.K., "Power line interference noise removal in ECG-a comparative study", *IJCSE*, 7: 13-18, (2015)
- [7] Hamiane M., Al-Heddi I.Y., "Automatic detection of abnormalities in ECG signals : a Matlab study", *International Journal of Biology And Biomedical Engineering*, 9: 121-126, (2015).
- [8] Sharma M., Dalal H., "Designing and implementation of digital filter for power line interference suppression", *IJSETR*, 3: 1831-1836, (2014).
- [9] Uppanlawar I.V., Chowhan H., "Pre-processing of ECG Signals Using Filters", *IJCTT*, 11: 166-168, (2014)
- [10] Patial P., Singh E.K., "Efficient filtering techniques of ECG signal using fir low pass filter with various window techniques", *IJARCSSE*, 4: 641-647, (2014).



- [11] Georgieva-Tsaneva G., Tcheshmedjiev K., “Denoising of electrocardiogram data with methods of wavelet transform”, *CompSysTech*, Ruse, 9-16, (2013).
- [12] Mbachu C.B., Offor K.J., “Reduction of noise in ECG signal using FIR digital filter implemented with hamming window”, *IJSET*, 2: 1380-1387, (2013).
- [13] Joshi L.S., Vatti R.A. and Tornekar R.V., “A Survey on ECG signal denoising techniques”, *International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, MIR Labs Thatipur Gwalior India, 60-64, (2013).
- [14] Joshi P.J., Patkar V.P., Pawar A. B., Patil P.B., Bagal U. R. and Bipin D.M., “ECG denoising using Matlab”, *IJSER*, 4: 1401-1405, (2013)
- [15] Mbachu C.B., Onoh G.N., Idigo V.E., Ifeagwu E.N. and Nnebe S.U., “Processing ECG signal with kaiser window- based FIR digital filters”, *IJEST*, 3: 6775-6783, (2011).
- [16] Afonso V. X., “*ECG QRS detection*”, *Biomedical Digital Signal Processing: C-language Examples and Laboratory Experiments for the IBM PC*”, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River NJ, (1993).
- [17] Moody G.B., Mark R.G., “The impact of the MIT-BIH arrhythmia database”, *IEEE Eng in Med and Biol*, 20: 45-5, (2001).
- [18] Khobragade P. B., Thakare S. S., “Image compression techniques- a review”, *IJCSIT*, 5: 272-275, (2014).
- [19] [https://en.wikipedia.org/wiki/Welch's\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Welch's_method)



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

# Darbe genişlik modülasyonlu DA–DA dönüştürücüler için yeni bir yumuşak anahtarlama pasif bastırma hücresi

*A novel soft switching passive snubber cell for pulse width modulation DC–DC converters*

Yazar(lar) (Author(s)): Yakup ŞAHİN<sup>1</sup>, Naim Süleyman TİNĞ<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-6792-2550

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-3743-0824

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Şahin Y. ve Tınğ N. S., “Darbe genişlik modülasyonlu DA–DA dönüştürücüler için yeni bir yumuşak anahtarlama pasif bastırma hücresi”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 183-192, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.371477

# Darbe Genişlik Modülasyonlu DA–DA Dönüştürücüler İçin Yeni Bir Yumuşak Anahtarlama Pasif Bastırma Hücresi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Yakup ŞAHİN<sup>1\*</sup>, Naim Süleyman TINÇ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Bitlis Eren Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Erzincan Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 03.02.2017 ; Kabul/Accepted : 29.04.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada darbe genişlik modülasyonuna (DGM) sahip DA–DA dönüştürücüler için yeni bir yumuşak anahtarlama pasif bastırma hücresi sunulmuştur. Bu yeni dönüştürücüde anahtar sıfır akımda anahtarlama (SAA) ile iletme girer ve sıfır gerilimde anahtarlama (SGA) ile kesime girer. Bununla beraber, ana diyot ise sırasıyla SGA ile iletme ve SAA ile kesime girer. Böylece hem anahtar hem de ana diyot için anahtarlama kayıpları azaltılmış olur. Ayrıca, ana diyotun ters toparlanma kayıpları da önemli ölçüde azaltılır. Dönüştürücüdeki yardımcı yarıiletkenlerde tamamen yumuşak anahtarlama ile anahtarlanır. Önerilen dönüştürücü basit bir yapıya, düşük maliyete ve uygulama kolaylığına sahiptir. Bu çalışmada önerilen yeni dönüştürücünün detaylı teorik analizi yapılmış ve 200 W gücünde bir laboratuvar çalışması yapılmıştır. Sonuçta, elde edilen deneysel sonuçlar ile teorik analizler doğrulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** DA–DA dönüştürücüler, sıfır akımda anahtarlama (SAA), sıfır gerilimde anahtarlama (SGA), yumuşak anahtarlama.

## A Novel Soft Switching Passive Snubber Cell for Pulse Width Modulation DC–DC Converters

### ABSTRACT

A new soft switching passive snubber cell for pulse width modulation (PWM) DC–DC converters is proposed in this paper. In the new converter, the switch is turned on with zero current switching (ZCS) and is turned off with zero voltage switching (ZVS). Besides, the main diode is turned on and off with ZVS and ZCS, respectively. Thus, the switching losses both of switch and main diode are reduced. In addition, the reverse recovery losses of main diode are significantly minimized. The auxiliary semiconductors in the snubber cell are completely operated with soft switching. The proposed converter has a simple structure, low cost and ease of application. In this study, the detailed theoretical analysis of new converter is made and a 200 W laboratory prototype is implemented. Finally, the theoretical analyses are verified with the experimental results.

**Keywords:** DC–DC converters, zero current switching (ZCS), zero voltage switching (ZVS), soft switching

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Darbe genişlik modülasyonuna (DGM) sahip DA–DA dönüştürücüler hızlı dinamik cevap, kolay kontrol ve ucuz yapılarından dolayı endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu dönüştürücülerde güç yoğunluğunu artırmak için anahtarlama frekansı artırılmalıdır. Çünkü anahtarlama frekansı artırılınca giriş filtre endüktansının ve çıkış filtre kondansatörünün boyutları önemli ölçüde küçülür. Bu sayede güç yoğunluğu artırılmış olur. Fakat anahtarlama frekansının artırılması anahtarlama kayıplarına ve elektromanyetik girişime (EMG) neden olur. DA–DA dönüştürücülerde ortaya çıkan bu sorunların üstesinden gelebilmek için yumuşak anahtarlama (YA) teknikleri kullanılmaktadır.

DGM dönüştürücülerde YA teknikleri modern YA teknikleri ve klasik YA teknikleri olmak üzere ikiye ayrılır. YA tekniklerinin uygulanması için dönüştürücüye ilave düzenler eklenmesi gerekir. Eklenen bu ilave düzenlere bastırma hücresi adı verilir [1-2]. Modern YA bastırma hücrelerinde anahtarlama kayıpları tamamen sıfırlanır [3–7]. Böylece anahtarlama kayıpları bakımından etkili sonuçlar alınır. Ancak bu dönüştürücülerde en az bir ilave yardımcı anahtara ve bunun haricinde yardımcı yarıiletkenlere ihtiyaç duyulur. Eklenen bu yardımcı elemanlar dönüştürücü maliyetini artırır ve uygulama zorluğuna yol açar. Ayrıca ilave yardımcı anahtar için ilave bir kontrol sinyali gerekir. İkinci bir kontrol sinyali ise dönüştürücünün kontrolünün zorlaştırır

Modern YA hücrelerinin aksine, klasik YA hücreleri düşük maliyet, basit kontrol ve uygulama kolaylığı gibi özelliklere sahiptir. Klasik YA hücrelerinin en önemli

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

özelliği ilave yardımcı anahtara ihtiyaç duymamasıdır. Böylece dönüştürücünün kontrolü çok basitleşir ve maliyet kayda değer ölçüde artmaz. Klasik YA hücreleri her ne kadar avantajlı yapılar sunsa da onlarında kendi içinde aşılması gereken problemleri vardır. Bazı dönüştürücülerde iletme girmede çok iyi SAA sağlansa da kesime girmede yarı-SGA ile anahtarlama gerçekleşir [8], bazılarında ise iletme girmede SAA yeterince iyi değildir [9–10]. Ana akım yolları üzerinde yardımcı yarıiletkenlerin olması ise dönüştürücünün toplam verimini önemli ölçüde düşürür [11]. Bastırma hücresindeki yardımcı yarıiletken elemanların sayısının artması hem dönüştürücü maliyetini artırır hem de uygulama gücü oluşturur [12–16]. Bazı bastırma hücreleri ise sadece özel DA–DA dönüştürücü topolojilerine uygulanabilir ve temel DA–DA dönüştürücülere uygulanamaz [17–19].

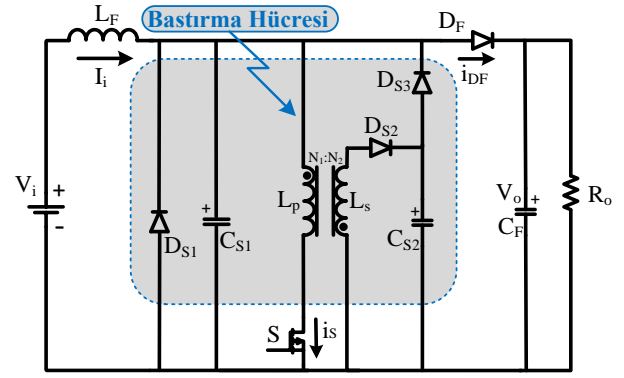
Bu çalışmada DGM DA–DA dönüştürücüler için bir yeni yumuşak anahtarlama hücresi sunulmuştur. Sunulan bu dönüştürücüde anahtar SAA ile iletme ve SGA ile kesime girer. Ana diyot ise SGA ile iletme ve SAA ile kesime girer. Ayrıca bu diyotun ters toparlanma kayıpları önemli ölçüde azaltılır. Diğer tüm yarıiletkenlerin YA ile anahtarlандığı bu dönüştürücü hafif yüklerde YA altında çalışabilmekte ve etkili sonuçlar vermektedir. Sunulan dönüştürücü ucuz bir maliyete ve basit bir yapıya sahiptir. Ayrıca sadece ana anahtar için DGM sahip bir kontrol sinyaline ihtiyaç duymasın dolayı kontrolünü oldukça kolaydır.

Bu çalışmada, Bölüm 2’de önerilen dönüştürücünün teorik analizi yapılmış ve Bölüm 3’te tasarım kriterleri sunulmuştur. Son bölüm olan Bölüm 4’te önerilen dönüştürücüye ait deneysel sonuçlar verilmiştir. Bu bölümde sert anahtarlama (SA) ve YA deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır.

## 2. ÖNERİLEN DÖNÜŞTÜRÜCÜ VE ÇALIŞMA ARALIKLARI (PROPOSED CONVERTER AND OPERATING INTERVALS)

Önerilen yeni YA hücresine sahip DGM DA–DA dönüştürücü Şekil 1’de sunulmuştur. Bu dönüştürücüde  $V_i$  giriş gerilim kaynağı,  $V_o$  çıkış gerilim kaynağı,  $L_F$  giriş filtre endüktansı ve  $C_F$  çıkış filtre kondansatörü,  $S$  anahtar,  $D_F$  ana diyot,  $D_{S1}$ ,  $D_{S2}$ , ve  $D_{S3}$  yardımcı diyotlar,  $C_{S1}$  ve  $C_{S2}$  bastırma kondansatörleri,  $L_p$  ile  $L_s$  ise geri dönüşlü transformatörün primer ve sekonder endüktanslarıdır.

test cihazlarından oluşmaktadır. Kollektörler aktif tip ve tek geçişli olarak tasarlanmıştır. Kollektörlerin yutucu plaka geometrisi haricinde tüm özellikleri aynıdır. İmalatı yapılan kollektörlerin teknik özellikleri Çizelge 1.’de verilmiştir. Kollektörlerin izolasyon ve montajı termal kamera yardımı ile test edilmiş ve gerekli iyileştirmeler yapılmıştır. Kurulan deney düzeneği Şekil 2.’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Önerilen DGM DA–DA Dönüştürücü (Proposed PWM DC–DC Converter)

Önerilen dönüştürücünün bir periyot kararlı hal analizinde yedi çalışma aralığı oluşur. Çalışma aralıklarına ait eşdeğer devre şemaları Şekil 2’de verilmiştir. Teorik dalga şekilleri ise Şekil 3’te verilmiştir.

**Aralık 1:** [ $t_0 < t < t_2$ : Fig. 2 (a)]:  $t_0$  anından önce anahtar kesim durumunda,  $C_{S1}$  ve  $C_{S2}$  kondansatörleri çıkış gerilimine şarj olmuş durumda ve ana diyot ana akımı iletmektedir.  $t_0$  anında anahtara iletim sinyali verilmesiyle bu aralık başlar. Bu aralık süresince ana diyot akımı lineer bir şekilde azalırken anahtar akımı lineer bir şekilde artar.  $t_1$  anında anahtar akımı giriş akımı seviyesine erişince ana diyot akımı sıfır seviyesine düşer. Bu aralıkta anahtar, seri  $L_p$  endüktansı sayesinde SAA ile iletme girer. Bu aralık için aşağıdaki denklemler geçerlidir:

$$i_{Lp}(t) = i_s(t) = \frac{V_o}{L_p}(t - t_0) \quad (1)$$

$$i_{DF}(t) = I_i - i_{Lp} = I_i - \frac{V_o}{L_p}(t - t_0) \quad (2)$$

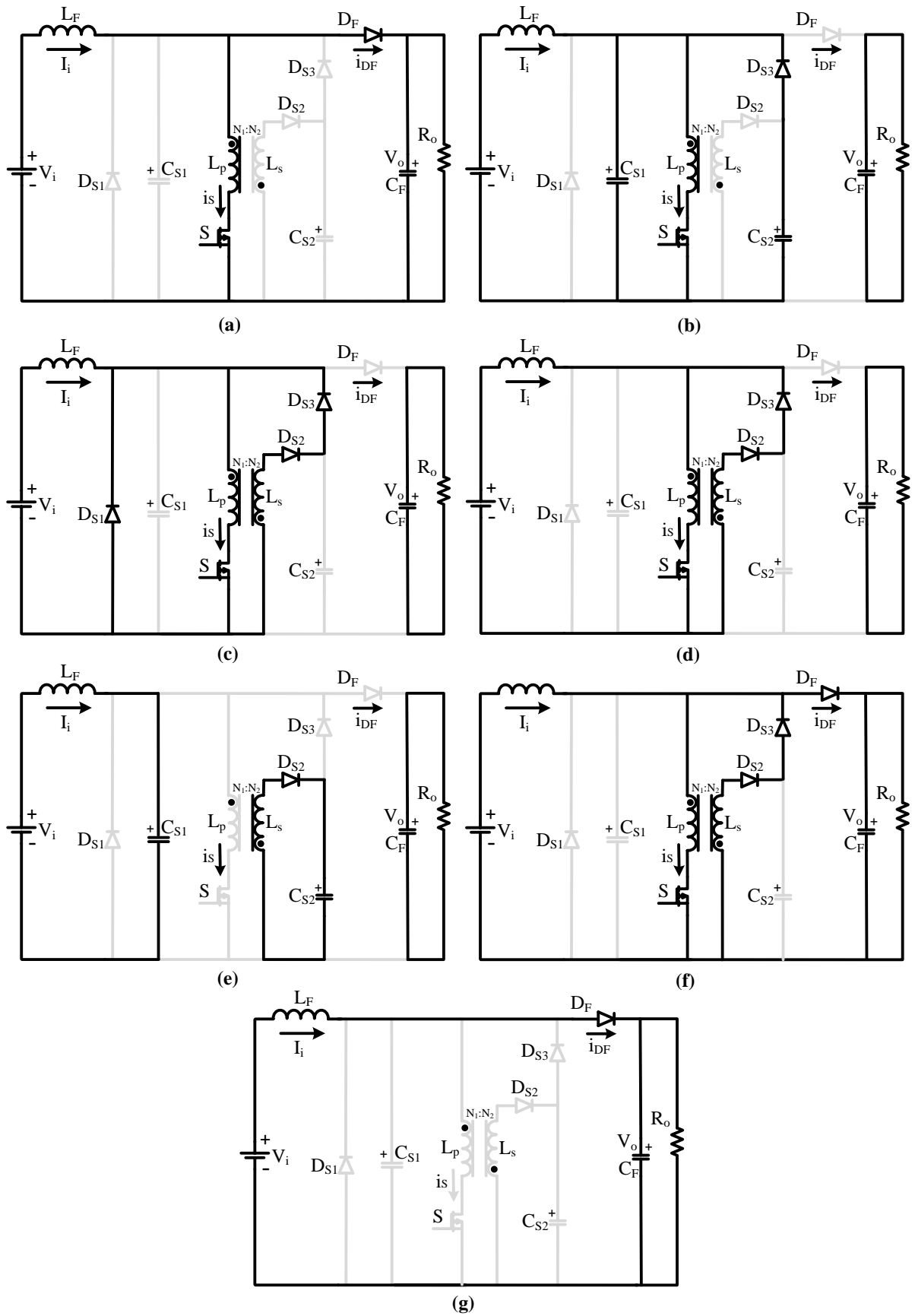
$t_1$  anından sonra ana diyotun ters toparlanma süresi boyunca anahtar akımı lineer bir şekilde artmaya devam eder.  $t_2$  anında ana diyot akımı  $-I_{rr}$  değerine düşer ve bu aralık sona erer. Diyot kesime girdiğinde  $C_{S1}$  ve  $C_{S2}$  kondansatörlerinin gerilim değeri çıkış gerilimine eşit olduğu için ana diyot SGA ile kesime girer. Bu aralık için aşağıdaki eşitlikler geçerlidir:

$$i_{Lp}(t) = i_s(t) = I_i + \frac{V_o}{L_p}(t - t_1) \quad (3)$$

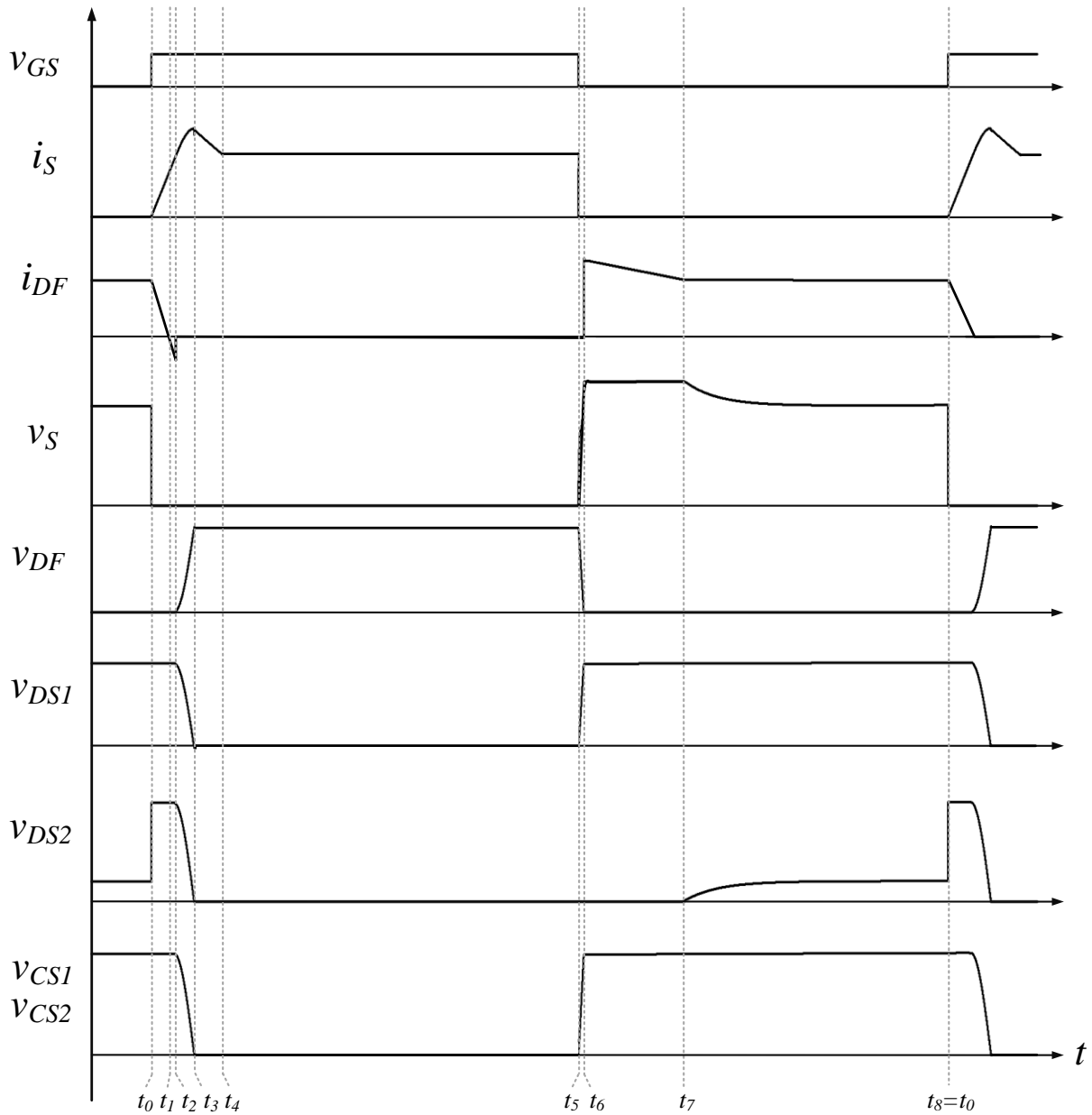
$$i_{DF}(t) = -\frac{V_o}{L_p}(t - t_1) \quad (4)$$

$$I_{Lp2} = i_{Lp}(t_2) = i_s(t_2) = I_i + I_{rr} \quad (5)$$

$$I_{DF2} = i_{DF}(t_2) = -I_{rr} \quad (6)$$



Şekil 2. Çalışma aralıklarına ait eşdeğer devre şemaları (Equivalent circuit schemes for operating intervals)



Şekil 3. Çalışma aralıklarına ait teorik dalga şekilleri (Theoretical waveforms for operating intervals)

**Aralık 2: [ $t_2 < t < t_3$ : Fig. 2 (b)]:**  $t_2$  anında  $L_p - C_{S1} - C_{S2}$  arasında başlayan rezonans ile ikinci aralık başlar. İki kondansatör direkt olarak  $L_p$  endüktansının uçlarına bağlı olduğu için bu elemanlar arasında bir L - C rezonansı oluşur.  $C_{S1}$  ve  $C_{S2}$  kondansatörleri paralel bağlı olduğundan bu iki kondansatör rezonansa eşzamanlı katılır. Dolayısıyla iki kondansatörün gerilimi de eş zamanlı olarak azalır. Bu aralığın sonunda kondansatörlerin gerilimi sıfıra düşmesiyle bu aralık sona erer.

$$i_{L_p}(t) = i_S(t) = I_i + I_{rr} \cos \omega_1(t-t_2) + \frac{V_o}{Z_1} \sin \omega_1(t-t_2) \quad (7)$$

$$v_{C_{S1}}(t) = v_{C_{S2}}(t) = V_o \cos \omega_1(t-t_2) - I_{rr} Z_1 \sin \omega_1(t-t_2) \quad (8)$$

$$I_{L_p \max} = I_i + \sqrt{V_o^2 + Z_1^2 I_{rr}^2} / Z_1 \quad (9)$$

$$W_{L_p \max} = \frac{1}{2} L_p (I_i + I_{rr})^2 + \frac{1}{2} (C_{S1} + C_{S2}) V_o^2 \quad (10)$$

$$\omega_1 = 1 / \sqrt{L_p (C_{S1} + C_{S2})} \quad (11)$$

$$Z_1 = \sqrt{L_p / (C_{S1} + C_{S2})} \quad (12)$$

**Aralık 3: [ $t_3 < t < t_4$ : Fig. 2 (c)]:**  $t_3$  anında  $D_{S1}$  ve  $D_{S2}$  diyotları eş zamanlı olarak iletme girer. Primer endüktansındaki giriş akımının üstünde kalan akım  $D_{S1}$  diyotundan akmaya başlar.  $D_{S2}$  diyotunun akımı sıfırdan itibaren artmaya başlarken  $D_{S1}$  diyotundaki akım ise tepe değerinden sıfıra doğru azalmaya başlar.  $t_4$  anında  $D_{S1}$  diyotunun akımı sıfıra düşüncü  $D_{S2}$  diyotunun akımı tepe değerine erişir. Böylece primer ile sekonder arasında akım paylaşımı gerçekleşir ve bu aralık sona erer. Bu aralık için aşağıdaki eşitlikler yazılır:

$$I_{Ls4} = (I_{Lp\max} - I_i) \frac{N_1}{N_2} = \frac{\sqrt{V_o^2 + Z_1^2 I_{rr}^2}}{Z_1} \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (13)$$

$$I_{Lp4} = I_i + I_{Ls4} = I_i + \frac{\sqrt{V_o^2 + Z_1^2 I_{rr}^2}}{Z_1} \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (14)$$

**Aralık 4: [ $t_4 < t < t_5$ : Fig. 2 (d)]:** Bu aralık boyunca giriş filtre endüktansı giriş gerilim kaynağı altında enerjilenir. Bu aralık klasik yükseltici dönüştürücünün iletim aralığıdır.

$$I_S = I_{Lp4} \quad (15)$$

**Aralık 5: [ $t_5 < t < t_6$ : Fig. 2 (e)]:**  $t_5$  anında anahtarın kontrol sinyalinin kesilmesiyle bu aralık başlar. Anahtara paralel  $C_{S2}$  kondansatörü yardımıyla anahtar SGA ile kesime girer. Bu esnada giriş akımı da  $C_{S1}$  kondansatörünü şarj eder ve  $C_{S1}$  kondansatörünün gerilimi lineer olarak artar.  $t_6$  anında  $C_{S1}$  ve  $C_{S2}$  kondansatörlerinin gerilimi çıkış gerilimine ulaşınca  $D_F$  ana diyotu SGA ile iletime girer ve aralık sona erer. Bu aralık için aşağıdaki eşitlikler yazılır:

$$i_{Ls}(t) = I_{Ls\max} \cos \omega_2(t - t_5) \quad (16)$$

$$v_{Cs1}(t) = \frac{I_i}{C_{S1}}(t - t_5) \quad (17)$$

$$v_{Cs2}(t) = I_{Ls\max} Z_2 \sin \omega_2(t - t_5) \quad (18)$$

$$I_{Ls\max} = \sqrt{\left(1 + n^2\right) \frac{V_o^2 + Z_1^2 I_{rr}^2}{Z_1^2 n^4} + \frac{2I_i(V_o^2 + Z_1^2 I_{rr}^2)^{1/2}}{Z_1^2 n^3}} \quad (19)$$

$$\omega_2 = 1 / \sqrt{L_S C_{S2}} \quad (20)$$

$$Z_2 = \sqrt{L_S / C_{S2}} \quad (21)$$

**Aralık 6: [ $t_6 < t < t_7$ : Fig. 2 (f)]:** Önceki aralıkta tam olarak deşarj olamayan  $L_S$  sekonder endüktansı bu aralık boyunca deşarj olmaya devam eder.  $L_S$  endüktansının akımı lineer bir şekilde azalır ve  $t_7$  anında sıfır seviyesine düşüncü bu aralık sona erer. Bu aralık için aşağıdaki denklemler geçerlidir:

$$i_{Ls}(t) = I_{Ls6} - \frac{V_o}{L_S}(t - t_6) \quad (22)$$

$$i_{DF} = I_i + i_{Ls}(t) \quad (23)$$

**Aralık 7: [ $t_7 < t < t_8 = t_0$ : Fig. 2 (g)]:** Bu aralık klasik yükseltici dönüştürücünün kesim aralığıdır. Aralık boyunca anahtar kesim durumunda ve ana diyot giriş akımını geçirir. Anahtara tekrardan kontrol sinyali uygulanınca bir periyot çalışma tamalanır ve başlangıç koşullarına geri dönlür. Bu aralık için aşağıdaki denklemler geçerlidir:

$$I_{DF} = I_i \quad (24)$$

### 3. TASARIM PROSEDÜRÜ (DESIGN PROCEDURE)

Bu bölümde önerilen dönüştürücü için tasarım kriterleri sunulmuştur. Tasarım yapılırken 50 V giriş ve 100 V çıkış gerilimleri, 100 kHz anahtarlama frekansı ve 200 W çıkış gücü koşulları göz önüne alınmıştır.

#### a) $L_F$ Filtre Endüktansı Seçimi:

Yüksek bir güç yoğunluğu için filtre endüktansındaki akım dalgalanması ( $\Delta I_{LF}$ ) %20 olarak alınmıştır. Bu varsayma göre aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$\Delta I_{Lr} = 0.2 I_o \frac{V_o}{V_i} = 0.8 A \quad (25)$$

$$L_F = \frac{V_i(V_o - V_i)}{\Delta I_{LF} f_s V_o} = 312 \mu H \quad (26)$$

Uygulamada filtre endüktans değeri 320  $\mu H$  olarak seçilmiştir.

#### b) $C_F$ Filtre Kondansatörü Seçimi:

DA-DA dönüştürücülerde çıkış gerilim dalgalanmasının ( $\Delta V_o$ ) %1 olması istenir. Bu çerçevede, filtre kondansatörünün değeri aşağıdaki eşitlikle belirlenebilir:

$$C_F = \frac{I_o D}{\Delta V_o f_s} = 10 \mu F \quad (27)$$

Uygulamada iki adet 5  $\mu F$  kondansatör paralel olarak bağlanmıştır.

#### c) $L_P$ Endüktansı Seçimi:

Bu endüktans seçilirken ana diyotun ters toparlanma süresi  $t_{tr}$  dikkate alınmıştır. Ana diyotun ters toparlanma kayıplarının minimum olabilmesi için anahtar iletime girdiğinde içinden geçen akımın giriş akımına erişme süresi en az  $3t_{tr}$  olmalıdır. Buna göre  $L_P$  endüktansı seçilirken şu eşitlik göz önüne alınabilir:

$$L_P \geq 3t_{tr} \frac{V_o}{I_i} \approx 4.9 \mu H \quad (28)$$

#### d) Sarım Oranının Seçimi:

Bastırma hücresindeki geri dönüşlü transformatorün sarımlar oranı seçilirken yarıiletkenlerde oluşan gerilim stresleri dikkate alınır. Sarım oranı  $n = N_2/N_1$  ile yarıiletkenler üzerinde oluşan gerilim stresleri arasındaki eşitlik şöyledir:

$$V_S = V_o \left(1 + \frac{1}{n}\right) \quad (29)$$

$$V_{DS2} = V_o(1 + n) \quad (30)$$

Denklem (29) anahtar üzerinde oluşan gerilim stresini Denklem (30) ise  $D_{S2}$  yardımcı diyotunda oluşan gerilim stresini ifade eder. Bu eşitlikler referans alınarak  $n$  değeri uygulamada 4 olarak seçilmiştir.

#### e) $C_{S1}$ ve $C_{S2}$ Kondansatörlerinin Seçimi:

Anahtar kesime girdiğinde üzerindeki gerilimin çıkış gerilimine erişme süresi anahtarın kesime girme süresi  $t_f$  değerinden uzun olmalıdır. Buna göre  $C_{S1}$  aşağıdaki eşitliğe göre seçilebilir:

$$\frac{C_{S1}}{I_i} V_o \geq t_f \quad (31)$$

$C_{S2}$  kondansatörü için ise aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\frac{C_{S2}}{I_{LS \max}} V_o \geq t_f \quad (32)$$

Uygulamada  $C_{S1}$  kondansatörü 2.2 nF ve  $C_{S2}$  kondansatörü 3.3 nF olarak seçilmiştir.

#### 4. DÖNÜŞTÜRÜCÜ ÖZELLİKLERİ (CONVERTER FEATURES)

Önerilen YA hücreğine sahip PWM DC-DC dönüştürücüye ait özellikler aşağıda sunulmuştur:

1. Anahtar SAA ile iletme girer ve SGA ile kesime girer. Böylece anahtarın anahtarlama kayıpları önemli ölçüde azaltılır.
2. Ana diyot SAA ile kesime girer ve SGA ile iletme girer. Böylece ana diyotun ters toparlanma kayıpları önemli ölçüde azaltılır.
3. Yardımcı diyotlar tamamen YA ile anahtarlanır. YA tekniğiyle yardımcı diyotların anahtarlama kaybı oluşturması engellenir.
4. Anahtar üzerindeki gerilim stresi çok küçük seviyede olduğu için daha büyük değerlerde bir anahtar seçilmesi gerekmez.
5. Ana diyot üzerinde herhangi bir gerilim ya da akım stresi oluşmaz.
6. YA anahtarlama koşulları geniş bir yük aralığında sağlanır.
7. Geçici rejim aralıkları periyodun çok küçük bir kısmını işgal eder.
8. Yüksek frekans koşullarında bile PWM çalışma korunur.
9. Dönüştürücüde ilave yardımcı anahtar bulunmadığı için kontrolü çok kolaydır.
10. Önerilen dönüştürücü basit bir yapıya sahiptir.
11. Bastırma hücresinin maliyeti düşüktür.

#### 5. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Çizelge 1'de verilen çalışma değerleri ve yarıiletken elemanlar kullanılarak, önerilen dönüştürücünün 200 W güç değerinde deneysel çalışması yapılmıştır.

Şekil 4'te 200 W güç değerinde, anahtara ait SA ve YA anahtarlama deneysel sonuçlar verilmiştir. Şekil 4(a)'da anahtarın iletme girmesi aşamasında akım ve gerilimin üst üste binmesi sonucu oluşan anahtarlama kayıpları ve akım pikleri görülmektedir. SA ile anahtarlama akım yükselme hızı  $di/dt$  çok yüksektir ve bu yükselme hızı şöyle ifade edilir:

$$\left( \frac{di_s}{dt} \right)_{HS} = \frac{I_i}{t_r} = \frac{4}{44 \cdot 10^{-9}} = 90.9 \text{ A} / \mu\text{s} \quad (33)$$

Şekil 4(c)'de YA hücreсі yardımıyla SAA ile anahtarlama sağlanarak akımın yükselme hızı yavaşlatılmıştır. Böylece akım ile gerilimin üst üste binmesi azaltılarak iletme girme kayıplarının azaltıldığı görülmektedir. YA ile iletme girme anında yavaşlatılan akım yükselme hızı değeri şöyle ifade edilir:

$$\left( \frac{di_s}{dt} \right)_{SS} = \frac{V_o}{L_p} = \frac{100}{5 \cdot 10^{-6}} = 20 \text{ A} / \mu\text{s} \quad (34)$$

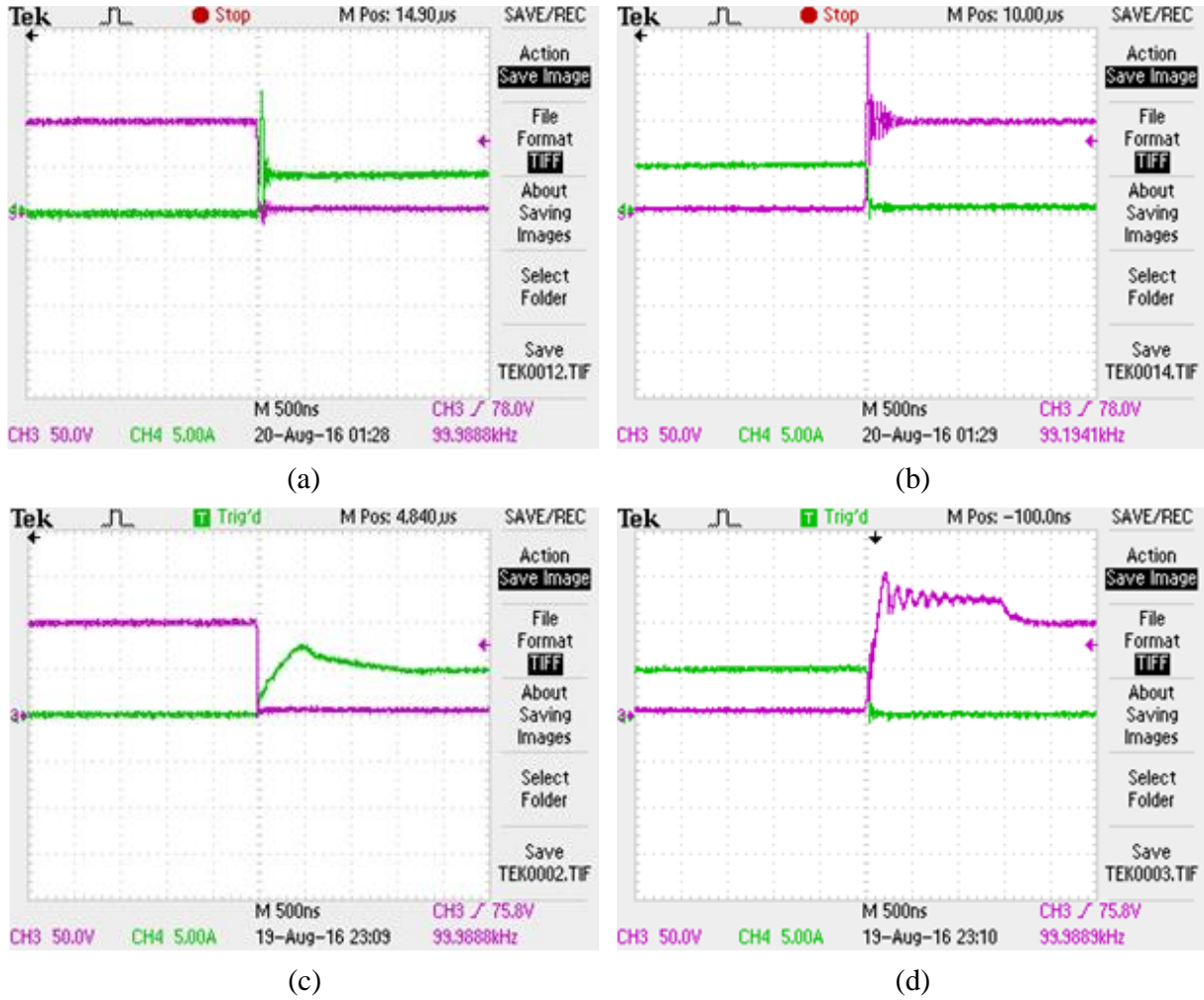
**Çizelge 1.** Deneysel çalışmada kullanılan yarıiletken elemanlar ve çalışma koşulları (Semiconductor elements and specifications used in the experimental prototype)

Parametre & Sembol	Değer & Birim
DA giriş gerilimi, $V_i$	50 V
DA çıkış gerilimi, $V_o$	100 V
Çıkış gücü, $P_o$	200 W
Anahtarlama frekansı, $f_s$	100 kHz
Filtre endüktansı, $L_F$	320 $\mu$ H
Primer endüktansı, $L_p$	5 $\mu$ H
Filtre kondansatörü, $C_F$	2*5 $\mu$ F
Bastırma kondansatörü, $C_{S1}$	2.2 nF
Bastırma kondansatörü, $C_{S2}$	3.3 nF
Sarım oranı, $N_2/N_1 = n$	4
Yarıiletkenler	Elektriksel Değerler
S:STW40NF20	(200 V, 4 A)
D <sub>F</sub> :MUR460	(600 V, 4 A)
D <sub>S1</sub> : UF4004	(400 V, 1 A)
D <sub>S2</sub> : UF4006	(800 V, 1 A)
D <sub>S3</sub> : UF4004	(400 V, 1 A)

Benzer şekilde Şekil 4(b)'de anahtarın kesime girmesi aşamasında anahtar üzerinde kesime girme anahtarlama kayıpları görülmektedir. Ayrıca dikkat edilirse anahtar üzerinde hem gerilim pikleri hem de yüksek frekanslı salınımlar oluşur. Gerilim pikleri anahtarın daha büyük seçilmesini zorunlu kıldığı için maliyeti artırır. Kesime girmede oluşan salınımlar ise EMG gürültülerine neden olur. Kesime girme anında kesime girme anahtarlama kayıplarının oluşmasının nedeni gerilim yükselme hızının  $dv/dt$  yüksek olmasıdır. SA ile anahtarlama kesime girme anında gerilim yükselme hızı şöyle ifade edilir:

$$\left( \frac{dv_s}{dt} \right)_{HS} = \frac{I_i}{C_{oss}} = \frac{4}{0.5 \cdot 10^{-9}} = 8 \text{ kV} / \mu\text{s} \quad (35)$$





Şekil 4. 200 W güç değerinde anahtar için SA sonuçları iletime girme (a) kesime girme (b) ve YA sonuçları iletime girme (c) kesime girme (d). [akımlar: yeşil, gerilimler: pembe, 50 V/div, 5 A/div, 500 ns/div] (For 200 W power, hard switched (a)turned-on, (b) turned-off and soft switching (c) turned-on (d) turned-off for switch [currents: green, voltages: pink, 50 V/div, 5 A/div, 500 ns/div])

Şekil 4(d)'de SGA tekniğiyle kesime girme anında gerilim yükselme hızı azaltılarak kesime girme anahtarlama kayıpları azaltılmış ve anahtar üzerinde oluşan EMG gürültüleri dikkate değer ölçüde azaltılmıştır. SGA ile anahtarlama gerilim yükselme hızı şöyle ifade edilir:

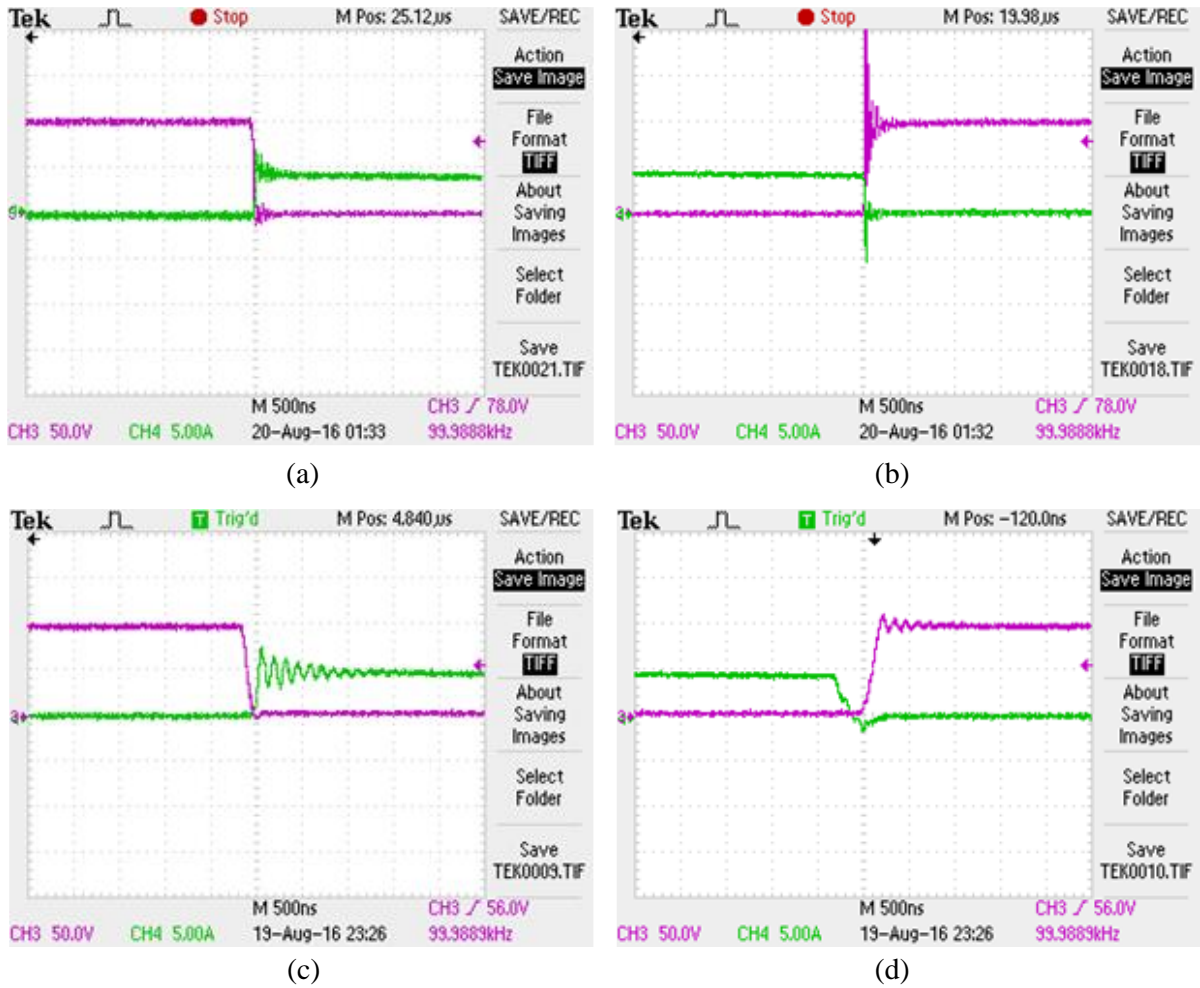
$$\left(\frac{dv_s}{dt}\right)_{SS} = \frac{I_i + I_{Ls\max}}{C_{S1} + C_{S2}} = \frac{5.6}{5.5 \cdot 10^{-9}} \cong 1 \text{ kV} / \mu\text{s} \quad (36)$$

Şekil 5'te 200 W güç değerinde ana diyota ait SA ve YA anahtarlama deneysel sonuçlar verilmiştir. Şekil 5(a)'da diyot iletime girerken akım ve gerilimin üst üste binmesi sonucu oluşan anahtarlama kayıpları görülmektedir. Şekil 5(c)'de YA hücresi yardımıyla SGA ile anahtarlama sağlanarak iletime girme kayıplarının azaltıldığı görülmektedir. Benzer şekilde Şekil 5(b)'de diyotun kesime girme aşamasında üzerinde gerilim piklerinin oluştuğu görülmektedir. Bununla beraber diyotun ters toparlanma akımının yaklaşık olarak giriş akımı kadar olduğuna da dikkat edilmelidir. SA ile

anahtarlama ana diyotun ters toparlanma anındaki akım yükselme hızının yüksek olması ters toparlanma kayıplarını artırır.  $D_F$  ana diyotunda ters toparlanma akım yükselme hızı şöyledir:

$$\left(\frac{di_{DF}}{dt}\right)_{HS} = \frac{I_i}{t_r} = \frac{4}{50 \cdot 10^{-9}} = 80 \text{ A} / \mu\text{s} \quad (37)$$

Diyotlarda ters toparlanma, diyot tabanlarında biriken yük değerine ( $Q_{RR}$ ) bağlıdır. Bu yük değeri de ters toparlanma süresini etkiler. Yük akımının artması durumunda diyot tabanında biriken yük artar. Buna bağlı olarak artan ters toparlanma süresi ise diyotun ters toparlanma kayıplarını artırır.



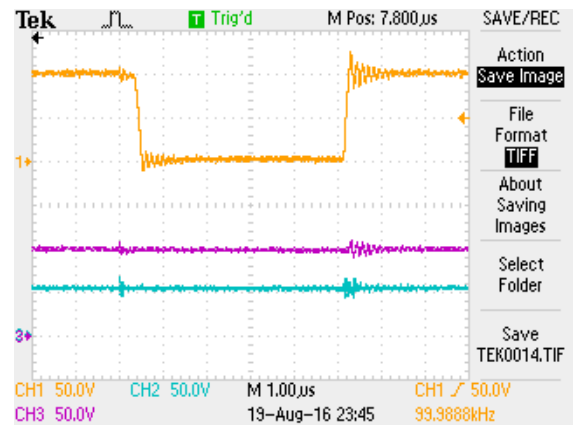
Şekil 5. 200 W güç değerinde ana diyot için SA sonuçları iletme girme (a), kesime girme (b) ve YA sonuçları iletme girme (c) kesime girme (d). [akımlar: yeşil, gerilimler: pembe, 50 V/div, 5 A/div, 500 ns/div] (For 200 W power, hard switched (a) turned-on, (b) turned-off and soft switching (c) turned-on (d) turned-off for switch [currents: green, voltages: pink, 50 V/div, 5 A/div, 500 ns/div])

Şekil 5(d)'de SAA tekniğiyle hem kesime girmede gerilim pikleri tamamen yok edilmiş hem de diyotun ters toparlanma kayıpları önemli ölçüde azaltılmıştır. Buna göre SAA tekniğiyle ana diyotun ters toparlanma anındaki akım yükselme hızı sınırlandırılmış ve daha düşük bir değere indirilmiştir:

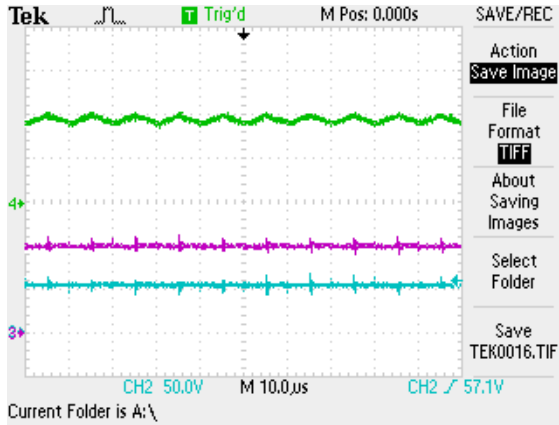
$$\left(\frac{di_{DF}}{dt}\right)_{SS} = \frac{V_o}{L_p} = \frac{100}{5 \cdot 10^{-6}} = 20 \text{ A} / \mu\text{s} \quad (38)$$

Şekil 6'da giriş gerilimi, çıkış gerilimi ve  $C_{S1}$  kondansatörünün gerilimi sunulmuştur. Şekilden  $C_{S1}$  kondansatörünün geriliminin çıkış gerilimini aşmadığı görülmektedir. Ayrıca çıkış gerilimindeki dalgalanma çok küçüktür.

Şekil 7'de giriş ve çıkış gerilimleri ile beraber giriş endüktansı akımı sunulmuştur. Şekilden, akım dalgalanmasının hesaplanan değere yakın olduğu görülebilir. Böylece yüksek bir güç yoğunluğu elde edilmiş ve akım dalgalanması düşük olduğu için DA giriş kaynağının ömrü korunmuştur.

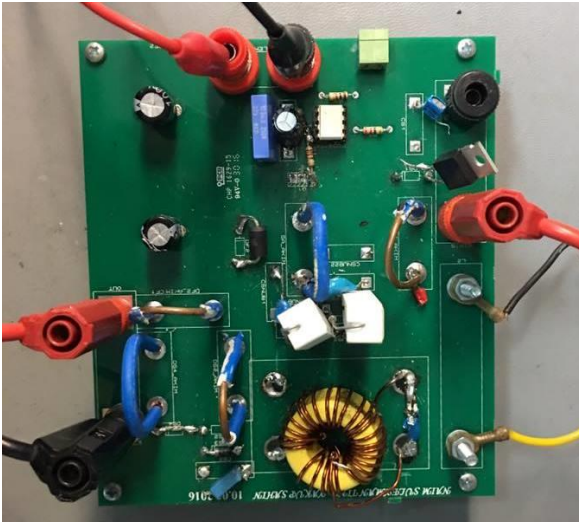


Şekil 6.  $C_{S1}$  kondansatörü gerilimi (sarı), giriş gerilimi (mavi) ve çıkış gerilimi (pembe) [50 V/div, 1  $\mu\text{s}/\text{div}$ ] (Voltage of  $C_{S1}$  (yellow), input voltage (blue) and output voltage (pink) [50 V/div, 1  $\mu\text{s}/\text{div}$ ])



Şekil 7. Giriş endüktansı akımı (yeşil), giriş gerilimi (mavi) ve çıkış gerilimi (pembe) [50 V/div, 2 A/div, 10 µs/div] (input inductance current (green), input voltage (blue) and output voltage (pink) [50 V/div, 2 A/div, 10 µs/div])

Önerilen YA anahtarlama hücresine sahip yükseltici DC-DC dönüştürücünün deneysel çalışmasına ait fotoğraf Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Deneysel çalışmaya ait fotoğraf (The photo of experimental prototype)

Çizelge 2. Önerilen dönüştürücü için SA ve YA çalışmaların karşılaştırılması (Comparison of HS ve SS operations for the proposed converters)

	S				D <sub>F</sub>		
	İletime Girme		Kesime Girme		Kesime Girme		
	$di/dt$	Akım Stresi	$dv/dt$	Gerilim Stresi	$I_{rr}$	$di/dt$	Gerilim Stresi
SA	90.9 (A/µs)	$3I_i$ (A)	8 (kV/µs)	$2V_o$	$1.25I_i$ (A)	80 (A/µs)	$2V_o$
YA	20 (A/µs)	$1.5I_i$ (A)	1 (kV/µs)	$1.5 V_o$	$0.5I_i$ (A)	20 (A/µs)	Hayır

Önerilen dönüştürücünün 200 W güç değerinde SA verimi %92,5 değerinde iken YA verimi ise %95.9 değerinde ölçülmüştür. Ölçümler yüksek hassasiyetli güç analizörü ile elde edilmiştir. Tam yükteki verim sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Tam yükte verim (The efficiency at nominal power)

Gerekli matematiksel analiz yapıldıktan sonra SA ve YA çalışmalarının, akım yükselme hızları, gerilim yükselme hızları ile akım-gerilim stresleri bakımından karşılaştırılması Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelgeye göre, SA çalışmada akım yükselme hızı YA akım yükselme hızının 4.5 katıdır. Ayrıca yine SA akım stresi 2 kat daha fazladır. Yine anahtar için kesime girmede, SA durumunda gerilim yükselme hızı 8 kat daha fazladır. Ayrıca gerilim stresi SA durumunda daha yüksektir. Bu da analiz gösteriyor ki YA ile anahtarlama durumunda anahtardaki fiziksel değerler daha makul düzeylerde olmaktadır.

Ana diyot için YA anahtarlama durumunda ters toparlanma akımı daha düşük seviyelerdedir. Ayrıca YA ile anahtarlama, kesime girme anında akım yükselme hızının 4 kat azaltıldığına dikkat edilmelidir. Son olarak YA hücresi yardımıyla ana diyot üzerinde oluşan gerilim stresleri tamamen yok edilmiştir. Sonuç olarak önerilen YA hücresi yardımıyla, ana diyotun dönüştürücüde daha az fiziksel zorlanmaya maruz kalarak çalışması sağlanmıştır.

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada yeni bir pasif bastırma hücresine sahip yumuşak anahtarlama DGM DA-DA yükseltici dönüştürücü sunulmuştur. Sunulan çalışmada yumuşak anahtarlama teknikleri kullanılarak ana yarıiletkenlerdeki anahtarlama kayıplarının ve EMG

analiz edilmiştir. Elde edilen ölçümler, sunulan bastırma hücresinin tam yükte sert anahtarlama çalışmaya göre %3,4 verim kazancı sağladığını göstermiştir. Önerilen dönüştürücü basit yapısı ve ucuz maliyeti sayesinde diğer temel DGM DA-DA dönüştürücülere de kolaylıkla uygulanabilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Aksoy I., “Yeni bir yumuşak anahtarlama DC-DC PWM dönüştürücünün tasarım, analiz ve uygulaması,” *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (2007).
- [2] Sahin Y., “PWM DC-DC dönüştürücü ailesi için yeni bir yumuşak anahtarlama hücresinin tasarımı, uygulaması ve karşılaştırmalı analizi,” *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (2016).
- [3] Ting N. S., Sahin Y. and Aksoy I., “Analysis, design and implementation of a zero-voltage-transition interleaved boost converter,” *Journal of Power Electronics*, 17(1): 41–55, (2017).
- [4] Ting N. S., Aksoy I. and Sahin Y., “ZVT-PWM DC-DC boost converter with active snubber cell”, *IET Power Electronics*, 10(2): 251-260, (2017).
- [5] Sahin Y., Aksoy I. and Ting N. S. "An improved ZCZVT PWM DC-DC boost converter" *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 33(4): 639-651, (2015).
- [6] Wang C. M., Lin C. H., Lu C. M. and Li J. C., “Design and realisation of a zero-voltage transition pulse-width modulation interleaved boost power factor correction converter”, *IET Power Electronics*, 8(8): 1542–1551, (2015).
- [7] Sahin Y., Ting N. S. and Aksoy I., “A highly efficient zvt-zct pwm boost converter with direct power transfer”, *Electrical Engineering*, doi:10.1007/s00202-017-0546-y
- [8] Li R. T. H., Chung H. S. H. and Sung A. K. T., “Passive lossless snubber for boost PFC with minimum voltage and current stress”, *IEEE Transactions on Power Electronics.*, 25(3): 602–613, (2010).
- [9] Mohammadi M. and Adib E., “Reducing turn off losses with a passive lossless snubber for boost converter”, *The 5th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*, Tehran: 385–389, (2014).
- [10] Mohammadi M. and Adib E., “Lossless passive snubber for half bridge interleaved flyback converter”, *IET Power Electronics*, 7(6): 1475–1481, (2014).
- [11] M. Mohammadi and E. Adib, “Lossless passive snubber for half bridge interleaved flyback converter”, *IET Power Electronics*, 7(6): 1475–1481, (2014).
- [12] Mohammadi M., Adib E. and Farzanehfard H., “Passive lossless snubber for double-ended flyback converter”, *IET Power Electronics*, 8(1): 56–62, (2015).
- [13] Choi B. H., Lee S. W., Thai V. X. and Rim C. T., “A Novel Single-SiC-Switch-Based ZVZCS Tapped Boost Converter”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(10): 5181–5194, (2014).
- [14] Mohammadi M., Adib E. and Farzanehfard H., “Lossless passive snubber for double ended flyback converter with passive clamp circuit”, *IET Power Electronics*, 7(2): 245–250, (2014).
- [15] Kim S. J. and Do H. L., “Coupled-inductor boost integrated flyback converter with high-voltage gain and ripple-free input current”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(8): 5618–5624, (2016).
- [16] Do H. L., “A soft-switching DC/DC converter with high voltage gain,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(5): 1193–1200, (2010).
- [17] Chen Z., Zhou Q. and Xu J. “Novel family of PWM soft-single-switched DC-DC converters with coupled inductors”, *IET Power Electronics*, 8(2): 245–250, (2014).
- [18] Zhan T., Zhang Y., Nie J., Zhang Y. and Zhao Z., “A novel soft-switching boost converter with magnetically coupled resonant snubber”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(11): 5680–5687, (2014).
- [19] Mohammadi M., Adib E. and Yazdani M. R., “Family of soft-switching single-switch PWM converters with lossless passive snubber”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(6): 3473–3481, (2015).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

## Alüminyum alaşımının derin çekilmesine sıcaklığın etkisinin deneysel ve sayısal olarak araştırılması

### *Experimental and numerical investigation of the effect of temperature on deep drawing of aluminium alloy*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Cebeli ÖZEK<sup>1</sup>, Vedat TAŞDEMİR<sup>2</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0001-7603-415X

*ORCID<sup>2</sup>:* 0000-0002-2375-9525

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article):** Özek C. ve Taşdemir V., “Alüminyum alaşımının derin çekilmesine sıcaklığın etkisinin deneysel ve sayısal olarak araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 193-199, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.392126

# Alüminyum Alaşımının Derin Çekilmesine Sıcaklığın Etkisinin Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Cebeli ÖZEK<sup>1</sup>, Vedat TAŞDEMİR<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Elbistan Meslek Yüksekokulu, Makine Programı, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 03.02.2017 ; Kabul/Accepted : 28.03.2017)

## ÖZ

5000 serisi Al-Mg alaşımları, süneklik, iyi kaynak edilebilirlik, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık özelliklerinden dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Bununla birlikte bu alaşımların oda sıcaklığında şekillendirilmesi mikroyapılarından dolayı çelik saclara nazaran zordur. Bu problemlerin üstesinden gelmenin en etkili yolu ılık şekillendirme. Bu çalışmada, şekillendirme sıcaklığının limit çekme oranı, istampa kuvveti, et kalınlığı, mikrosertlik ve gerilmeye etkisi deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Deneyler 25°C, 100°C, 175°C ve 250°C sıcaklıklarında, 3600 N baskı plakası kuvvetinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda sıcaklığın artması ile et kalınlığı değişiminin daha homojen hale geldiği, limit çekme oranının arttığı, mikrosertlik, gerilme ve istampa kuvvetinin azaldığı belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile elde edilen sayısal sonuçların deneysel veriler ile elde edilen sonuçlara yakın oldukları gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** AA5754 sac malzeme, limit çekme oranı, ılık derin çekme, mikrosertlik, sonlu elemanlar yöntemi.

## Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Temperature on Deep Drawing of Aluminum Alloy

### ABSTRACT

5000 series of Al-Mg alloys have found very wide application areas due to their ductility, good weldability, high strength and low weight properties. However, forming of these alloys is more difficult than steel sheets at room temperature due to their microstructure. The most effective way to overcome these problems is the warm forming. In this study, the effect of forming temperature on limit drawing ratio, punch force, wall thickness, microhardness and stress of cup were investigated experimentally and numerically. The experiments were conducted at 25°C, 100°C, 175°C, and 250°C temperatures under 3600 N blank holder force. As a result of the studies, it was determined that an increase in forming temperature led to more homogeneous distribution of wall thickness, increase of limit drawing ratio, decrease of microhardness, stress and punch forces. The finite element analysis (FEA) model results were also in a good agreement with the experimental results.

**Keywords:** AA5754 sheet metal, limit drawing ration, warm deep drawing, microhardness, finite element analysis

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Derin çekme sacların şekillendirilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir [1]. Bu yöntemle, iki boyutlu, düzlemsel geometriye sahip iş parçalarından belirli derinlik ve profillere sahip üç boyutlu ürünler elde edilir [2]. Basit ve karmaşık şekilli birçok parça kolaylıkla imal edilebildiğinden yiyecek ve içecek sanayinde, otomotiv, denizcilik, hava, savunma ve diğer birçok alanda bu yöntem oldukça önemli bir yere sahiptir. Son zamanlarda, Al, Mg gibi hafif ve dayanıklı alaşımların kullanımları birçok alanda giderek artmaktadır. Örneğin otomobillerin yakıt tüketiminin düşürülmesindeki temel faktör ağırlığının azaltılmasıdır [3]. Yakıt tüketiminin azaltılması, otomobil gövde ve yapılarındaki çeliğin alüminyum, magnezyum gibi hafif ve mukavemetli alaşımlarla yer değiştirmesi ile sağlanabilir [4-6]. Ancak Al-Mg alaşım-

larının şekillendirilmesi dinamik deformasyon sertleşmesi olayından dolayı oda sıcaklığında sınırlı oranda kalmaktadır [7, 8]. Bu durum hem elde edilen numunelerin kalitesini etkilemekte hem de daha yüksek çekme oranlarına ulaşmasını engellemektedir. Bu tür problemlerin üstesinden gelmenin en önemli yolu malzemeyi yeniden kristalleştirme sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta şekillendirmektir [9]. Sıcaklığın şekillendirme üzerinde iki önemli etkisi vardır. Birincisi, sıcaklık etkisi ile dinamik deformasyon sertleşmesinin ortadan kalkması ile malzemelerin şekillendirilebilirliklerinde önemli artışın görülmesi, ikincisi ise şekillendirilmiş kaplarda geri yaylanmaya yol açan kap duvarlarındaki gerilmelerin azalmasıdır [10, 11]. Laurant ve ark., AA5754-O alaşımının ılık şekillendirme koşullarındaki mekanik ve geri yaylanma özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda geri yaylanmaya sebep olan kap duvarlarındaki teğetsel gerilmeleri etkileyen temel faktörün sıcaklık olduğunu belirtmişlerdir [9]. Tebbe ve ark. da yeniden kristalleştirme sıcaklığının altındaki ılık şekillendirme

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

koşullarında karmaşık şekilli parçaların kalitesinin yüksek ve daha kolay çekilebildiğini belirtmişlerdir [10]. Toros ve ark., Al-Mg alaşımları üzerine yapmış oldukları çalışmada ılık şekillendirme koşullarında (200-300°C) elde edilen ürünlerin yüzey kalitesinin oda sıcaklığında elde edilen ürünlerin kalitesinden daha iyi olduğunu bulmuşlardır [12]. Ren ve ark., AZ31 magnezyum alaşımının ılık derin çekilmesini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal olarak incelemişlerdir. Sıcaklığın, dikdörtgen kesitli kapların şekillendirilebilirliğini arttırdığını ve derin çekilebilirliği etkileyen önemli bir faktör olduğunu deneysel ve sayısal olarak belirlemişlerdir [13]. Erdin ve diğ., yüksek mukavemetli ve düşük şekillendirme özelliğine sahip IMI 230 titanyum bakır alaşımı ile 20MnCr5 düşük karbonlu çelik sacların yüksek sıcaklıkta şekillendirilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda derin çekilebilirliği maksimuma çıkaran kritik sıcaklığın malzemeden malzemeye değişiklik gösterdiğini ve en büyük derin çekme yüksekliğinin yüksek sıcaklıklarda elde edildiğini belirtmişlerdir [14]. Görüleceği üzere yapılan bu çalışmalar, sıcaklığın malzemelerin şekillendirilmesini etkileyen önemli bir faktör olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, geniş bir kullanım alanına sahip olan AA 5754-O alaşımının ılık derin çekilmesi üzerine deneysel ve sayısal olarak bir araştırma yapılmıştır.

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

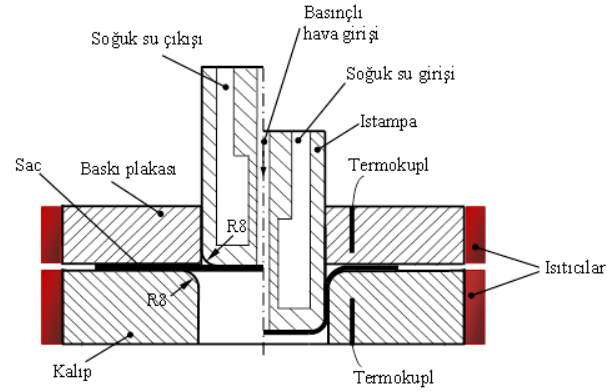
### 2.1. Materyal (Material)

Çalışmada, 1 mm kalınlığında EN AW-5754 (AlMg3) sac malzeme kullanılmıştır. Malzeme, "H111" işlemi uygulanmış halde temin edilmiş olup, çekme deneylerinden önce 380°C sıcaklıkta 4 saat tavlansak en yumuşak hal olan "O" şekline getirilmiştir. Malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 1'de, mekanik özellikleri ise Çizelge 2'de verilmiştir.

### 2.2. Metod (Method)

Deneyler, 25°C, 100°C, 175°C ve 250°C sıcaklıklarda yapılmıştır. İstampa ve kalıp köşe yarıçapları 8 mm ve

baskı plakası kuvveti (BPK) ise 3600 N olarak sabit tutulmuştur. Deneylerde, yüzeyler arasındaki sürtünmeleri azaltmak amacıyla MoS<sub>2</sub> (3-4 µm) yağlayıcı kullanılmıştır. Şekil 1'de deney düzeneğinin şematik görüntüsü verilmiştir. Çizelge 3'te ise deneylerde kullanılan işlem parametreleri verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği şeması (Schematic design of the testing apparatus)

Çizelge 3. Deneylerde kullanılan takım geometrisi ve işlem parametreleri (Drawing tool geometry and process parameters)

Parametre	Ölçü
Kalıp radyüsü, mm	8
İstampa radyüsü, mm	8
Baskı plakası kuvveti, N	3600
İlkel parça çapı, mm	85-109
İstampa hızı, mm/s	4
İstampa çapı, mm	39,60
Kalıp çapı, mm	42,30
Sac kalınlığı, mm	1
Tek taraflı kalıp boşluğu	1,35
Çekme sıcaklığı, °C	25, 100, 175, 250

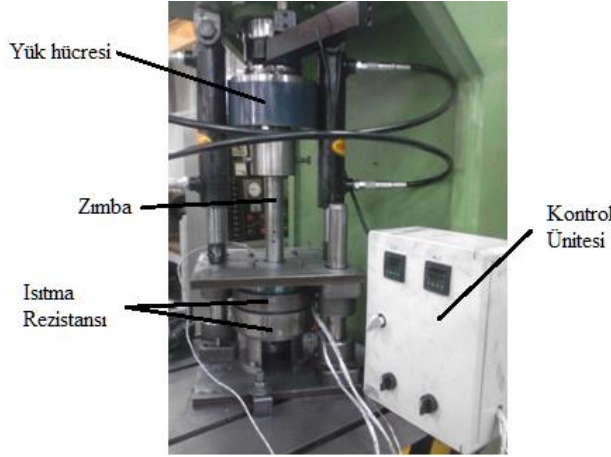
Çizelge 1. EN AW-5754 (AlMg3) sacının kimyasal analizi, % (Chemical composition of EN AW-5754 (AlMg3))

Kimyasal Bileşim, %											
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Al
0,13	0,3	0,019	0,14	2,72	0,005	0,005	0,022	0,018	0,01	0,013	Geriye

Çizelge 2. Deney numunesinin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri (Mechanical properties of test specimen at room temperature)

Hadde yönü (°)	Akma dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama (%)	Elastikiyet modülü (GPa)	Sertlik, HV0,2	
					Isıl işlem öncesi, "H111"	Isıl işlem sonrası, "O"
0	167,74	248,54	10,32	66	82,6	61,7
45	163,25	235,16	12,82			
90	165,64	240,11	11,68			

Kalıp ve baskı plakası ısıtıcı rezistanslarla ısıtılmış, ıstampa su ile ve sac malzeme ise basınçlı hava ile soğutulmuştur. Kalıp ve baskı plakasının sıcaklıkları kalıplar içerisine yerleştirilen termokupl ile kontrol edilmiştir. İstampaya gelen kuvvet 10-1 saniye aralıklarla tek yönlü kuvvet ölçme özelliğine sahip yük hücresi ile ölçülmüştür. Deneyler, 4 mm/s sabit ıstampa hızında gerçekleştirilmiştir. Deney malzemesi baskı plakası ile kalıp arasında belirlenen baskı plakası kuvvetinde yaklaşık 30-90 s arasında ısıtılmıştır. Şekil 2'de deneylerde kullanılan deney seti görülmektedir.



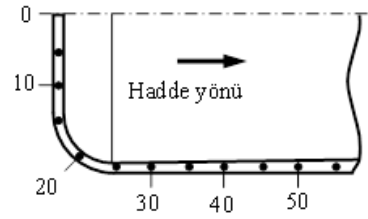
Şekil 2. Deney seti (Testing apparatus)

Deneyler neticesinde elde edilen kapların kalınlıklarını belirlemek için deney numunesi hassas bir şekilde kesilerek hadde doğrultusunda 5 mm aralıklarla bölüntülenmiş ve QLR digit marka 10-4 mm hassasiyetindeki dijital mikrometre ile belirlenen noktaların et kalınlıkları ölçülmüştür (Şekil 3).



Şekil 3. Et kalınlığı ölçümü (The measurement of wall thickness)

Kapların sertlik ölçümleri ise Emcotest DuraScan mikrosertlik cihazı ile hadde doğrultusunda kaplardan kesilip çıkartılarak bakalit içerisine gömülmüş numuneden çeşitli zımparalama ve parlatma işlemleri yapıldıktan sonra orta düzlem boyunca 5 mm aralıklarla 200 gr yük uygulanarak (HV 0,2 kg) yapılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Numunenin mikrosertlik ölçüm şeması (Microhardness measurement schema of the sample)

### 2.3. Sonlu Elemanlar Analiz Çalışmaları (Finite Element Analysis Studies)

Günümüzde metal şekillendirme işleminde, sonlu elemanlar yöntemi (SEY), optimum işlem parametrelerini bulmak için etkili bir araç olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Metal şekillendirmede optimum işlem parametrelerinin belirlenmesi, imalat maliyetini düşürmek, vakit kaybını önlemek ve sacın

Çizelge 4. Analizlerde kullanılan sac malzemenin mekanik özellikleri (Mechanical properties of sheet material used in analyzes) [4, 6, 9, 17]

Malzeme özelliği	25 °C	100 °C	175 °C	250 °C
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ), g	2700	2700	2700	2700
Elastikiyet modülü (Gpa),E	69	66	63	60
Poisson oranı, v	0,33	0,33	0,33	0,33
Akma dayanımı (MPa), $\sigma_a$	87	100	86	72.5
Sertleşme Modülü (MPa), K	350	350	250	200
Sertleşme üsteli, n	0,275	0,25	0,185	0,101

Çizelge 5. Analizlerde kullanılan sac ve kalıp malzemelerinin termal özellikleri (Thermal properties of sheet and die materials used in analyzes) [18]

Malzeme özelliği	Sac(Alüminyum)	Rijit kalıplar(Çelik)
Isı kapasitesi(J/kgK)	904	450
Isıl İletkenlik(W/mK)	220	70
Yoğunluk(kg/m <sup>3</sup> )	2700	7850



deformasyon davranışı üzerindeki etkilerini anlamak için oldukça önemlidir [15,16].

Çalışmada, deney numuneleri üzerinde meydana gelen deformasyonlar LS-DYNA çözümü ete/Dynaform paket programı ile belirlenmiştir. Alüminyum sacın şekillendirme simülasyonu için 36\*MAT\_3-PARAMETER\_BARLAT malzeme modeli kullanılmıştır. Ağ yapılarının oluşturulması esnasında, baskı plakası, ıstampa ve kalıbın ağ aralıkları maksimum 30 mm, minimum ise 0,5 mm olarak ayarlanmıştır, sac malzemede ise ağ aralığı 3 mm olarak alınmıştır.

Çizelge 4’de analizlerde kullanılan sac malzemenin farklı sıcaklıklardaki mekanik özellikleri, Çizelge 5’de ise sac ve kalıp malzemelerinin termal özellikleri verilmiştir.

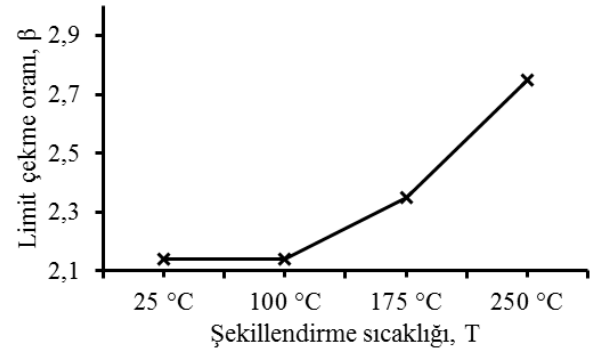
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1. Limit Çekme Oranı Sonuçları (Limit Drawing Ratio Results)

Şekil 5’de sıcaklığın limit çekme oranına (LÇÖ) olan etkisini belirlemek amacı ile yapılan deneyler sonucu elde edilen çekme numuneleri, Şekil 6’da ise limit çekme oranının sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Şekillerden, sıcaklık artışına bağlı olarak LÇÖ’nun arttığı görülmektedir. Özellikle 100 °C sıcaklıktan sonra bu artış daha net görülmektedir. Bu durum, sıcaklık etkisi ile dinamik deformasyon sertleşmesinin ortadan kalkmasına bağlı olarak malzemenin akma mukavemetinin azalması ve şekillendirme kabiliyetinin artmasıyla ilişkilendirilebilir. Boogaard, AA 5754 alaşımının ılık derin çekilmesi üzerine yapmış olduğu çalışmada, oda sıcaklığında 2,1 olan LÇÖ’yu 2,6’ya çıkarabilmiştir [19]. Yine Bolt ve arkadaşları da 250°C’de yaptıkları derin çekme deneyi neticesinde AA 5754 alaşımının LÇÖ’sunu 2,7’ye çıkarmışlardır [20]. Bu çalışmada ise sıcaklığın 25°C’den 250°C’ye yükseltilmesi ile limit çekme oranının 2,14’den 2,75’e çıktığı ve değişimin %28,5 olduğu görülmektedir.



Şekil 5. LÇÖ deneyleri sonucu elde edilen numuneler (Samples obtained from the results of LDR experiments)

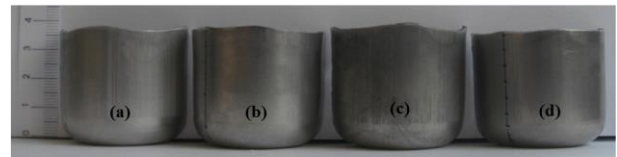


Şekil 6. LÇÖ’nun sıcaklıkla değişimi (The variation with temperature of LDR)

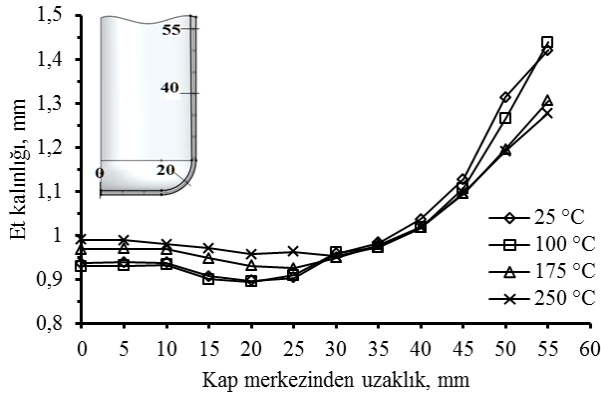
#### 3.2. Et Kalınlığı Sonuçları (Wall Thickness Results)

Derin çekme ile üretilen kapların kalınlık dağılımının homojen olması önemlidir. Kaplardaki bu kalınlık dağılımı elde edilen ürünlerin kalitesini doğrudan etkilemektedir.

Şekil 7’de, 2,14 LÇÖ için farklı sıcaklıklardaki deneyler sonucu elde edilen numuneler, Şekil 8’de ise 2,14 LÇÖ için et kalınlığı değişimi verilmiştir. Şekilden, bütün sıcaklıklar için et kalınlığında, kap merkezinden 10 mm’ye kadar (0-10 mm) önemli bir değişimin olmadığı, bu aralıktan sonra 20-25 mm aralığına kadar incelmelerin devam ettiği, sonrasında ise kalınlıkta artışın olduğu görülmektedir. Oda sıcaklığında (25°C), kap merkezindeki kalınlık 0,937 mm ölçülürken, 250°C’de 0,990 mm ölçülmüştür. Sıcaklığa bağlı olarak kap tabanındaki kalınlık değişimi yaklaşık %5’dir. Tüm sıcaklık değerleri için en büyük incelmelerin kap köşesinde ve hemen üzerinde olduğu belirlenmiştir. Oda sıcaklığında 0,898 mm olarak ölçülen en ince kalınlık, 100°C’de 0,895 mm, 175°C’de 0,926 mm, 250°C’de ise 0,953 mm’dir. Ayrıca kap ağzına doğru çıkıldıkça kalınlık değişiminin 25°C ve 100°C için önemli bir artışın olduğu görülmektedir. Buradan sıcaklığın, et kalınlığını etkileyen oldukça önemli bir parametre olduğu söylenebilir.

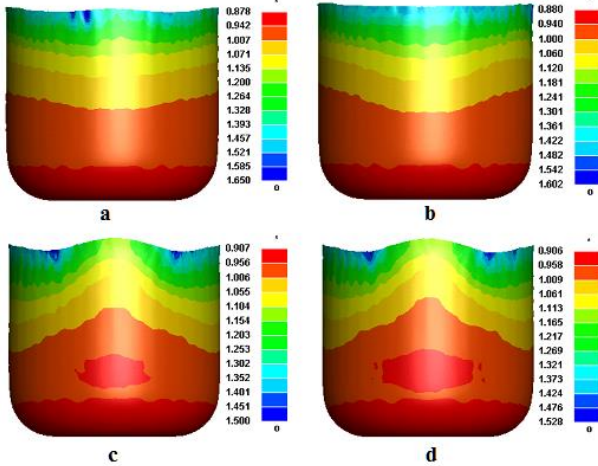


Şekil 7. 2,14 LÇÖ sonucu elde edilen numuneler (Samples obtained from 2,14 LDR) a)25°C b)100°C c)175°C d)250°C



Şekil 8. Şekillendirme sıcaklığının et kalınlığı üzerindeki etkisi (Effect of forming temperature on wall thickness)

Şekil 9'da ise şekillendirme sıcaklığının et kalınlığı üzerindeki etkisinin sonlu elemanlar analiz sonuçları verilmiştir. Analiz sonuçlarından, 25°C sıcaklık için kap merkezindeki kalınlık 0,930 mm iken şekillendirme sıcaklığı 250°C'ye çıkarıldığında kap merkezindeki kalınlık 0,974 mm olarak ölçülmüştür. Yine analizde de tüm sıcaklık değerleri için en büyük incelenen kap köşelerinde veya hemen üzerinde olduğu görülmektedir. 25°C'de 0,878 mm'ye düşen kalınlık değeri, 250°C'de 0,906 mm'ye düşmüştür. Kap üst kısımlarına doğru çıkıldıkça kap duvarında kalınlık değişiminin bütün sıcaklık değerleri için çok değişmediği, deneysel sonuçlarda olduğu gibi özellikle 25°C ve 100°C 'de elde edilen numunenin kap ağzında malzeme yığılmasından dolayı kalınlığın arttığı görülmektedir.



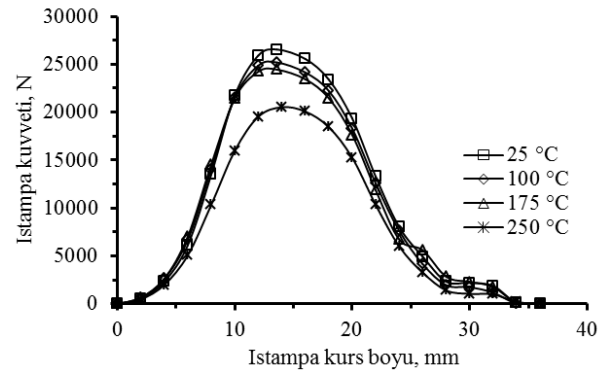
Şekil 9. Simülasyondan elde edilen kalınlık değişimi (Thickness variation obtained from simulations) a)25°C b)100°C c)175°C d)250°C

### 3.3. İstampa Kuvveti Sonuçları (Punch Force Results)

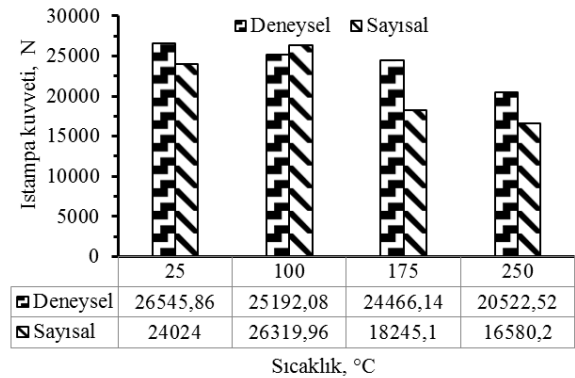
İstampa ile malzeme arasındaki temas sonucu sürtünmenin artması ile gerilme artar. Gerilmedeki bu artış kabın aşırı deformasyona uğramasına ve kalınlığının önemli ölçüde değişmesine neden olur. Bundan dolayı

deneysel parametrelerinin seçimi ıstampa kuvvetini önemli ölçüde etkiler [21].

2,14 LÇO sonucu elde edilen ıstampa kuvveti Şekil 10'da, deneylerden elde edilen ıstampa kuvveti sonuçları ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar ise Şekil 11'de verilmiştir. Şekillerden, sıcaklığın ıstampa kuvvetini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Deneylerden elde edilen ıstampa kuvveti, 250°C'de 26545,86 N iken 250°C'de 20522,52 N değerine düşmüş, böylece değişimin %22,69 olduğu bulunmuştur. Bu sonuç, sıcaklık artışı ile malzeme mukavemetinin azalması sonucu deformasyon için gerekli kuvvetin soğuk şekillendirmeye göre düştüğünü göstermektedir. Karşılaştırmalı sonuçlar incelendiğinde genellikle sayısal sonuçların deneysel sonuçlardan düşük olduğu görülmektedir. Bu durum derin çekme işleminde kalıp tasarımının ve bu tasarımın analiz ortamına aktarılmasının ve yine malzeme özelliklerinin eksiksiz tanımlanmasının ne kadar önemli olduğunu göstermiştir.



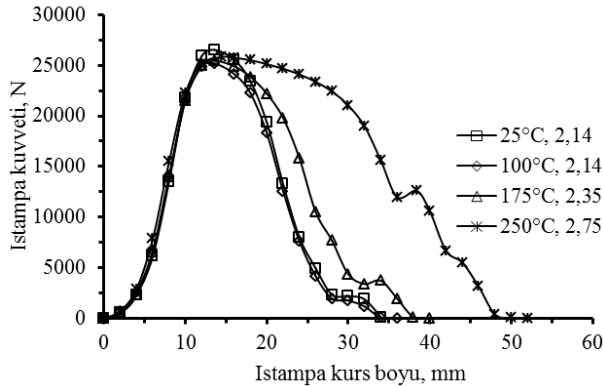
Şekil 10. İstampa kuvveti-sıcaklıkla ilişkisi (Punch force-temperature relation)



Şekil 11. Deneysel ve sayısal çalışmaların karşılaştırılması (Comparison of the experimental and numerical studies)

Şekil 12'de farklı limit çekme oranları sonucu elde edilen ıstampa kuvveti sonuçları görülmektedir. Deneylerden en büyük ıstampa kuvveti, 25°C için 26545,86 N; 100°C için 25192,08 N; 175°C için 24466,14 N ve 250°C için 20522,52 N olarak elde edilmiştir. Görüleceği üzere LÇO 2,14'den 2,75'e çıkmasına rağmen sıcaklığın etkisi ile ıstampa kuvvetinde bir artış olmamış kısmen düşmüştür.

Ancak çekilen kabın boyu arttıkça özellikle 2,75 LÇO'da kap ağzında meydana gelen malzeme yığılması sonucu oluşan ondülasyon nedeni ile ütleme kuvvetinde çok az da olsa bir artışın olduğu görülmektedir.

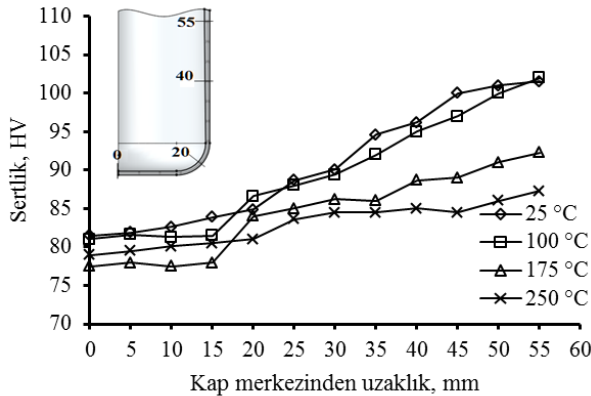


Şekil 12. Farklı LÇO'lar için ıstampa kuvveti değişimi (The variation of punch force for different LDR)

### 3.4. Sertlik ve Gerilme Dağılımı Sonuçları (Hardness and Stress Distribution Results)

Metallerin şekillendirilmesini etkileyen birçok önemli faktör vardır. Bu faktörlerden biri deformasyon sertleşmesidir. Malzemenin şekillendirilmesi esnasında meydana gelen deformasyon sertleşmesi kabın kalıp boşluğuna akışını, ıstampa kuvvetini, kaptaki kalınlık değişimlerini ve kaptaki gerilmeleri doğrudan etkiler [22].

Şekil 13'de sıcaklığın kap duvarlarındaki sertlik dağılımı üzerindeki etkisi verilmiştir. Şekilden en düşük sertlik değerinin kap tabanında olduğu, kap ağzına doğru çıkıldıkça sertlik değerinin arttığı görülmektedir. En fazla plastik deformasyona uğrayan bölge kap ağzı olduğu için en yüksek gerilme değeri ve sertlik de burada oluşmaktadır. Yine şekilden sıcaklık arttıkça sertlik değerinin düştüğü görülmektedir. En yüksek sertlik değeri 25°C'de 101,5 HV, 100°C'de 102 HV, 175°C'de 92,3 HV ve 250°C'de 87,3 HV olarak ölçülmüştür.

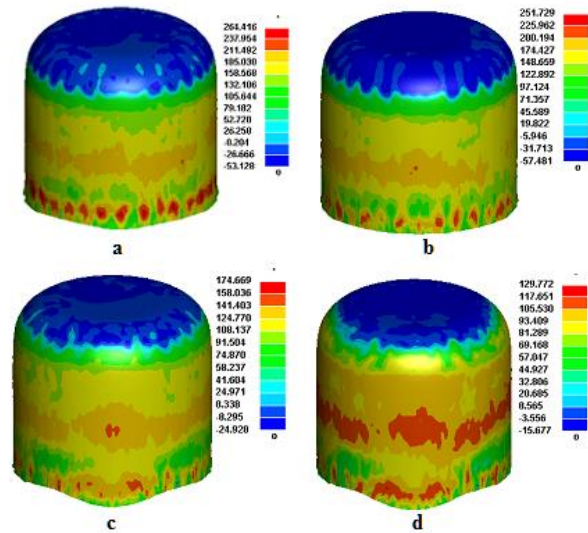


Şekil 13. Sıcaklığın sertlik dağılımı üzerindeki etkisi (Effect of temperature on hardness distribution)

Sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen numunelerde meydana gelen gerilme dağılımına sıcaklığının etkisi Şekil 14'de verilmiştir. Analiz sonuçlarında, en büyük

gerilme 25 °C'de 264,416 MPa, en düşük gerilme de 250 °C'de 129,772 MPa olarak elde edilmiştir, değişim yaklaşık %49'dur. Bu azalmanın sıcaklık etkisi ile malzeme mukavemetinin düşmesi ve buna bağlı olarak da malzeme akışının kolaylaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sıcaklığın şekillendirilen kaptaki gerilme dağılımını etkileyen oldukça önemli bir parametre olduğu söylenebilir.

En yüksek gerilmeler numunelerin kap ağzına yakın bölgelerinde oluşmaktadır. Bu durum bu bölgedeki malzeme yığılması sonucundaki deformasyon sertleşmesi ile açıklanabilir. Bu malzeme yığılması doğrudan kaptaki teğetsel gerilmeleri etkiler. Bu teğetsel gerilmeler ise geri yaylanma, şekillendirilen parçaların ömrü, tokluğu, çatlak oluşum direnci, manyetik özellikleri ve korozyon direnci üzerinde önemli bir rol oynar [6, 9].



Şekil 14. Çekilmiş kaplardaki ortalama gerilme dağılımı (MPa) (Mean stress distribution in the drawn cups) a) 25°C b) 100°C c) 175°C d) 250°C

### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

AA 5754 Al-Mg alaışımının derin çekme kalıplarında şekillendirilmesi esnasında sıcaklığın et kalınlığı, ıstampa kuvveti, sertlik ve gerilmeye etkisinin belirlenmesi amacı ile deneysel ve sayısal bir çalışma yapılmıştır. Çalışma neticesinde çıkarılan genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

-Sıcaklık artışı ile dinamik deformasyon sertleşmesinin azalması ve malzeme akışının kolaylaşması neticesinde limit çekme oranı %28,5 artmış ve kalınlık dağılımı daha homojen hale gelmiştir.

-İstampa kuvveti, sıcaklık 250°C'ye çıktığında oda sıcaklığına nazaran yaklaşık %22,69 oranında düşmüştür.

-Yine sıcaklık arttıkça kabın sertliğinin düştüğü ancak kap ağzına doğru çıkıldıkça deformasyon sertleşmesinden dolayı sertliğin arttığı görülmüştür.

-Çalışmadan, deneysel sonuçlarla sayısal simülasyon sonuçlarının uyum içinde oldukları görülmüştür. Bu uyum ıstampaya kuvveti için yaklaşık %75-95, kalınlık dağılımı için ise yaklaşık %95-97'dir.

-Sayısal çalışmadan elde edilen bir diğer sonuç da kaplardaki gerilmenin sıcaklık artışıyla önemli oranda azalmasıdır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Seçgin O. and Savaş V., "An experimental investigation of forming load and side-wall thickness obtained by a new deep drawing die", *Int J. Mater Form*, 3:209–213, (2010).
- [2] Özek C. and Ünal E., "The effect of die/blank holder angles on limit drawing ratio and wall thickness in deep drawing of square cups", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Vol 27, No 3, 615-622, (2012).
- [3] Greene D.L. and DiCicco, J., "Engineering-economic analyses of automotive fuel economy potential in the United States". ORNL/TM-2000/26, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, (2000).
- [4] Panicker S.S., Singh H.G., Panda S. K. and Dashwood R., "Characterization of tensile properties, limiting strains, and deep drawing behavior of AA5754-H22 sheet at elevated temperature", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24:4267–4282, (2015).
- [5] Abedrabbo N., Pourboghraat F. and Carsley J., "Forming of AA5182-O and AA5754-O at elevated temperatures using coupled thermo-mechanical finite element models", *International Journal of Plasticity* 23:841–875, (2007).
- [6] Laurent H., Coër J., Manach P.Y., Oliveira M.C. and Menezes L.F., "Experimental and numerical studies on the warm deep drawing of an Al-Mg alloy", *International Journal of Mechanical Sciences*, 93: 59–72, (2015).
- [7] Öztürk F., Pekel H. ve Halkacı H.S., "The effect of strain-rate sensitivity on formability of AA 5754-O at cold and warm temperatures", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20: 77–81, (2011).
- [8] Halim H., Wilkinson D.S. and Niewczas M., "The Portvein-Le Chatelier(PLC) effect and shear band formation in an AA5754 alloy", *Acta Mater.*, 55: 4151–4160, (2007).
- [9] Laurent H., Coër J., Grèze R., Manach, P.Y., Andrade-Campos A., Oliveira M.C. and Menezes L.F., "Mechanical behaviour and springback study of an aluminium alloy in warm forming conditions", *International Scholarly Research Network ISRN Mechanical Engineering*, ID:381615, (2011).
- [10] Tebbe P.A. and Kridli G.T., "Warm forming of aluminium alloys: an overview and future directions," *International Journal of Materials and Product Technology*, 21(1-3): 24–40, (2004).
- [11] Laurent H., Grèze R., Manach P.Y. and Thuillier S., "Influence of constitutive model in springback prediction using the split-ring test," *International Journal of Mechanical Sciences*, 51(3): 233–245, (2009).
- [12] Toros S., Ozturk F. and Kacar I., "Review of warm forming of aluminum-magnesium alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, 207: 1–12, (2008).
- [13] Ren L.M., Zhang S.H., Palumbo G., Sorgente D. and Tricarico L., "Numerical simulation on warm deep drawing of magnesium alloy AZ31 sheets", *Materials Science and Engineering A*, 499: 40–44, (2009).
- [14] Erdin M.E., Aykul H. and Tunahoğlu Ş., "Forming of high strength/low formability metal sheets at elevated temperatures", *Mathematical and Computational Applications*, 10(3): 331-340, (2005).
- [15] Kotkunde N., Deole A.D., Gupta A.K., Singh S.K., "Comparative study of constitutive modeling for Ti-6Al-4V alloy at low strain rates and elevated temperatures", *Materials and Design*, 55: 999–1005, (2014).
- [16] Samantaray D., Mandal S. and Bhaduri A.K., "A comparative study on Johnson Cook, modified Zerilli–Armstrong and Arrhenius-type constitutive models to predict elevated temperature flow behaviour in modified 9Cr–1Mo steel", *Comput Mater Sci*, 47, 568–576, (2009).
- [17] Dutton T., Mohamed M. and Lin J., "Simulation of warm forming of aluminium AA5754 for automotive panels", *12th International LS-DYNA User Conference*, (2012).
- [18] Abedrabbo N., Pourboghraat F. and Carsley J., "Forming of aluminum alloys at elevated temperatures - Part 2: Numerical modeling and experimental verification", *Int. J. Plast.*, 22: 342-373, (2006).
- [19] van den Boogaard A., "Thermally enhanced forming of aluminum sheet modeling and experiments", *Ph.D. thesis*, Twente University, (2002).
- [20] Bolt P.J, Lamboo N.A.P.M. and Rozier P.J.C.M., "Feasibility of warm drawing of aluminum products", *J Mater Proc Technol*, 115(1): 118–21, (2001).
- [21] Taşdemir V., "Açılı derin çekme kalıplarında sıcaklığın limit çekme oranına etkisinin araştırılması", *Doktora tezi*, Fırat Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, (2016).
- [22] Cotterell M., Schambergerova J. and Ziegelheim J., "Dependence of micro-hardness on deformation of deep-drawing steel sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, 124(3): 293–296, (2002).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

# Şekil hafıza davranışlarının termodinamiği

## *Thermodynamics of shape memory behaviours*

Yazar(lar) (Author(s)): Emre ACAR<sup>1</sup>, Murat AYDIN<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-1114-6251

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-3713-3029

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Acar E. ve Aydın M., “Şekil hafıza davranışlarının termodinamiği”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 201-211, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.386895

# Şekil Hafıza Davranışlarının Termodinamiği

*Derleme Makalesi / Review Article*

**Emre ACAR\*, Murat AYDIN**

Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Türkiye

(Geliş/Received : 14.02.2017 ; Kabul/Accepted : 01.06.2017)

## ÖZ

Akıllı malzemeler bugünkü teknolojik uygulamalarda önemli bir yer tutmaktadır. Metalik akıllı malzemeler olan şekil hafızalı alaşımlar ise yüksek dayanım ve fonksiyonel özellik gerektiren uygulamalarda kullanılma potansiyeline sahiptir. Şekil hafızalı alaşımların sıradışı özellikleri, termo-elastik martenzitik faz dönüşümlerinden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada, termo-elastik martenzitik faz dönüşümleri konusunda yapılmış çalışmalarda kullanılan termodinamik teorileri, denge termodinamik teorisi ve fenomenolojik termodinamik teorisi olarak iki ana başlık altında incelenmiştir. Daha sonra şekil hafızalı alaşımların dönüşüm sıcaklıkları ve ısıları termodinamik formüller ile ifade edilmiştir. Son olarak ise şekil hafızalı alaşımların davranışları genelleştirilmiş termodinamik teorileri ile açıklanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Şekil hafızalı alaşım, termodinamik, faz dönüşümü.

## Thermodynamics of Shape memory Behaviours

### ABSTRACT

Smart materials play important roles in today's technology. Shape memory alloys are metallic class of smart materials and they have promising potentials in applications that require high strength and functionality. The origin of the unusual properties of shape memory alloys is thermo-elastic martensitic phase transformation. In this study, thermodynamic theories used in analyzing the thermo-elastic martensitic phase transformations are reviewed by considering equilibrium thermodynamic theory and phenomenological thermodynamic theory. Then, transformation temperatures and heats are expressed by thermodynamic equations. Finally, shape memory behaviors are investigated by generalized thermodynamic theories.

**Keywords:** Shape memory alloy, thermodynamics, phase transformation.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Akıllı malzemeler, bilinen geleneksel malzemelere kıyasla farklı ve sıra dışı özelliklere sahiptir. Bunlardan metalik formda olanlar şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA) olarak isimlendirilmektedir [1]. Şekil hafızalı alaşımların, termo-elastik martenzitik faz dönüşümü sayesinde geniş çapta deformasyonları ısıtma ya da geri yükleme ile toparlama gibi bir kabiliyeti olduğu bilinmektedir [2-4]. Bu özgün özellikten dolayı, şekil hafızalı alaşımlar biyomedikal, otomotiv, yağ-petrol, havacılık, telekomünikasyon ve inşaat gibi birçok alanda aktüatör, stent, ameliyat malzemeleri, valf ve conta olarak kullanılmakta ve gelecekte bu kullanım alanlarının artması öngörülmektedir [1,5]. NiTi şekil hafızalı alaşımlar, yüksek süneklik, düşük yoğunluk, iyi korozyon dayanımı ve uzun yorulma ömrü gibi mükemmel fiziksel ve fonksiyonel özelliklerinden dolayı üzerinde en çok araştırma yapılan ve uygulamalarda kullanılan alaşım sistemidir [1,6].

Mikroyapıdaki martenzitik varyantlarının yeniden yönlendirilmesi ve gerilme kaynaklı martenzitik (Stress induced martensite, SIM) oluşması, şekil hafızalı alaşımlarda şekil değişimini meydana getiren iki temel mekanizmalardır [1,7,8]. Eğer şekil hafızalı bir malzeme, gerilme olmadan soğutulursa, ana faz olan östenit fazı martenzitik fazına sistemdeki enerjiyi minimum yapacak

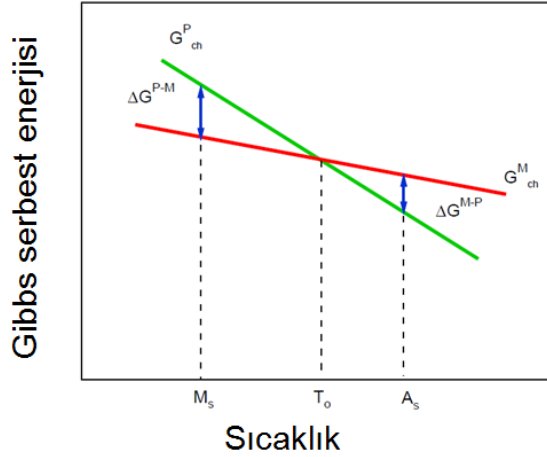
şekilde dönüşür ve bu dönüşümüne ileri dönüşüm denir. Malzeme dışarıdan bir gerilmeye maruz kalıyorsa, gerilme martenzitik varyantlarını önüne katar ve kendi doğrultusunda yeniden yönlendirir. İki durumda da, eğer malzeme östenit bitiş (Af) sıcaklığı üzerine ısıtılırsa, orijinal haline geri döner [1,9,10]. Oluşan martenzitik fazının, malzemenin orijinal fazı olan östenit fazına tekrar dönüşmesine de geri dönüşüm denir.

Martenzitik dönüşüm birçok metalik sistemde görülen bir tür katı faz dönüşümüdür. Termo-dinamik özelliklerine göre martenzitik dönüşümler termo-elastik ve termo-elastik olmayan faz dönüşümleri olarak ikiye ayrılır. Kısaca, tersinir olan faz dönüşümlerine termo-elastik, tersinir olmayanlara termo-elastik olmayan faz dönüşümleri denir [11]. Termo-elastik martenzitik dönüşümleri, difüzyonsuz gerçekleşen kristalografik katı faz dönüşümleridir. Bu dönüşüm, malzeme birim hücrelerindeki atom düzenlerinin değişimi şeklinde olmakta ve birim hücredeki bu şekil değişimlerin toplamı da kafes yapısında genel bir şekil değişimine neden olmaktadır. Bundan dolayı da termo-elastik martenzitik faz dönüşümünü mikroskobik seviyede gerçekleşen bir mekanik sürece benzetebiliriz [11].

Termo-elastik martenzitik dönüşümü, şekil hafızalı alaşımlarda değişik parametreler (sıcaklık, manyetik alan, gerilme) tarafından tetiklenebilen, geri döndürülebilir, katıdan katıya bir faz dönüşümüdür. Termo-elastik martenzitik dönüşümde, yüksek sıcaklık

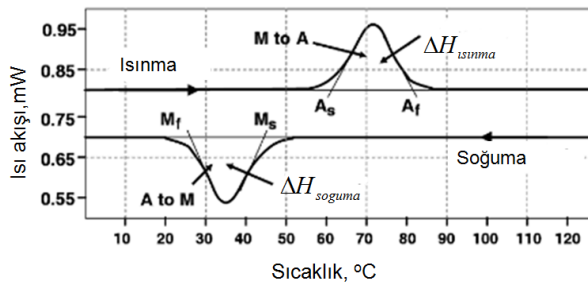
\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : emreacar@erciyes.edu.tr

fazı (östenit) ile düşük sıcaklık fazı (martenzit) arasında küçük bir hacim değişikliği ile beraber şekil değişimi söz konusudur. Bu faz dönüşümü, termodinamik olarak iki faz arasında oluşan Gibbs serbest enerji farkından kaynaklanır ve bu enerji farkı, faz dönüşümü için gerekli olan kimyasal itici gücü oluşturur [11-13]. En temel şekil hafıza özellikleri olan şekil hafıza etkisi ve süper-elastik davranış, direk olarak bu martenzitik dönüşüme bağlıdır. Şekil 1’de östenit ve martenzit fazlarının, sıcaklığa bağlı olarak Gibbs serbest enerji değerlerinin değişimi şematize edilmiştir.



Şekil 1. Gibbs serbest enerji-sıcaklık grafiği [14] (Not: Alıntıdan tercüme edilmiştir.) (Gibbs free energy-temperature graph).

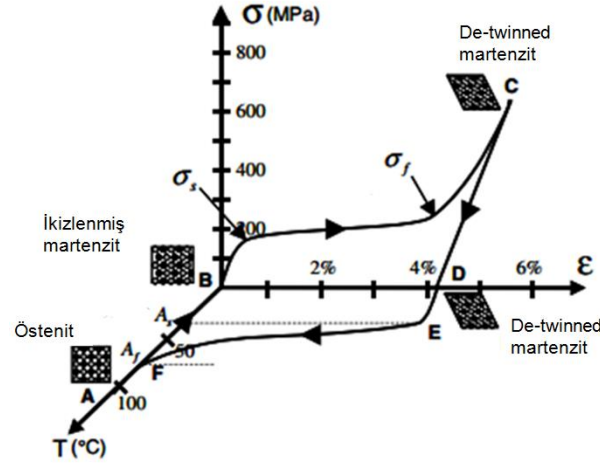
Aşağıda şekil hafızalı alaşımların karakteristik termomekanik davranışları görülmektedir. Şekil 2 şekil hafızalı alaşımların diferansiyel taramalı kalorimetre (differential scanning calorimetry, DSC) tekniği ile ölçülmüş faz dönüşüm grafiğini göstermektedir. Bu faz dönüşümü NiTi alaşımları için B2 (kübik) ile B19' (monoklinik) fazları arasında gerçekleşmektedir [1,15]. Malzeme yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru soğurken  $M_s$  sıcaklığına ulaştığında martenzit fazına dönüşmeye başlar ve bu faz dönüşümü  $M_f$  sıcaklığında tamamlanır. Tekrar yüksek sıcaklığa ısıtılırken, daha önce oluşan martenzit fazı  $A_s$  sıcaklığında östenit fazına dönüşmeye başlar ve bu faz dönüşümü  $A_f$  sıcaklığında tamamlanmış olur [16].



Şekil 2. Karakteristik DSC eğrisi [17] (Not: Alıntıdan tercüme edilmiştir.) (Characteristic DSC curves)

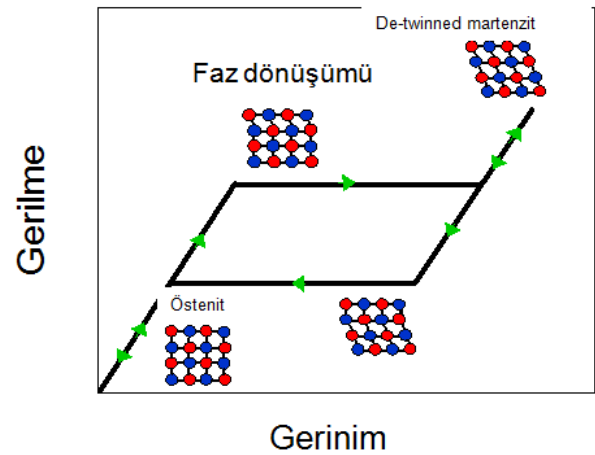
Şekil 3 ise ŞHA'ların şekil hafıza etkisini göstermektedir. Bu davranışta malzeme martenzit fazında deforme

edilmekte ve deformasyon sonrasında sıcaklık yeterli olmadığı için malzeme tekrar eski haline dönememektedir. Malzemenin tekrar eski haline dönebilmesi için dışarıdan sisteme enerji verilmesi gerekir. Malzeme  $A_f$  sıcaklığı üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılırsa sıcaklığın artması ile deforme olan martenzit yapı, tekrar orijinal fazı (deformasyondan önceki faz) olan östenit fazına geri döner. Faz dönüşümünün tamamen gerçekleşmesi için sıcaklığın  $A_f$  sıcaklık değeri üzerinde olması gerekir [18].



Şekil 3. Karakteristik şekil hafıza etkisi [17] (Not: Alıntıdan tercüme edilmiştir.) (Typical shape memory effect)

Şekil 4 tipik bir süper-elastik davranışı ve ilgili dönüşen fazları şematik olarak göstermektedir. Süper-elastik testler  $A_f$  sıcaklığının üzerindeki ve sabit tutulan sıcaklıklarda yapılmaktadır ve  $A_f$  üzerindeki sıcaklıklarda, östenit fazının deformasyonu gerilme kaynaklı martenzit oluşmasına neden olur.



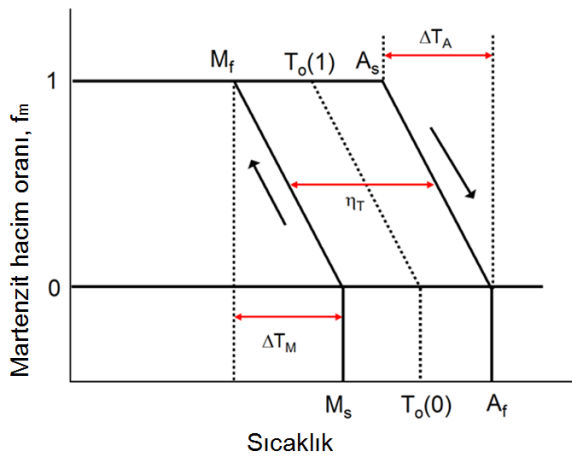
Şekil 4. Şekil hafızalı alaşımlarda tipik bir süper-elastik eğri [14] (Not: Alıntıdan tercüme edilmiştir.) (Typical super-elastic curve in SMAs)

Gerilme-birim şekil değişimi (stress-strain) grafiğinin ilk doğrusal kısmı östenit fazının elastik deformasyonunu gösterir. Bu elastik kısımdan sonra doğrusallıktan

ayrılma ve bir plato (gerilme değerinin sabit olduğu kısım) görülmektedir. Bu kısım gerilme indüklü martenzit dönüşümün başladığı yerdir ve gerilme uygulandıkça faz dönüşümü devam eder. Platonun sonunda östenit fazının tamamen martenzit fazına geçtiği kabul edilir. Platodan sonraki kısımda ise eğrinin tekrar yukarı çıktığı görülür. Bu kısımda ise tamamen martenzit olan malzeme elastik olarak deforme olmakla beraber bir miktarda ekstra ikizlenme gözlemlenebilir.

Uygulanan yükün kaldırılması sonucunda ilk olarak elastik biçimde deforme olan martenzit eski haline döner ve sonrasında martenzit tamamen orijinal hali olan östenit fazına geri döner. Süper-elastik davranış belli bir sıcaklık değerine ( $M_d$ ) kadar gözlemlenebilir.  $M_d$  sıcaklığından yüksek sıcaklıklarda, gerilme kaynaklı martenzit dönüşümünden önce, plastik deformasyon görüldüğünden, süperelastik davranış gözlemlenemez.

Şekil 5 ise gerilme altındaki şekil hafıza etkisi grafiğini şematik olarak ifade etmektedir. Bu grafikte  $M_s$  martenzit fazına geçiş başlangıç sıcaklığı,  $M_f$  martenzit fazına geçiş bitiş sıcaklığını gösterirken,  $A_s$  östenit fazına geçiş başlangıç sıcaklığı ve  $A_f$  östenit fazına geçiş bitiş sıcaklığını göstermektedir.



**Şekil 5.** Sabit gerilme altında şekil hafıza etkisinin şematik gösterimi (Not: Alıntidan tercüme edilmiştir.) (Schematic of shape memory effect under a constant stress)

Şekil 5'te görülen y-ekseni, dönüşümün bir derecesi olan martenzit hacim oranını ( $f_m$ ), x-ekseni ise dönüşüm için itici gücü (bu davranış için sıcaklık) göstermektedir. Yine aynı grafikte  $f(0)$  martenzit dönüşümünün başlama anındaki hacim oranını,  $f(1)$  ise martenzit dönüşümünün bittiği andaki hacim oranını ifade etmektedir. Martenzitik dönüşüm için itici güç sıcaklık, gerilme ya da manyetik alan olabilir [19]. Şekil 5'te gösterilen davranış için üç temel parametreden bahsedilebilir; denge sıcaklığı  $T_o$ , dönüm sıcaklık aralığı  $\Delta T$  (ileri ve geri faz dönüşümleri için aynı olduğu kabul edilirse) ve dönüşüm sıcaklık histerezi  $\eta_T$ . Dönüşümün termo-elastik oluşu  $\Delta T$  ile ve dönüşümün

doğasında bulunan histerezisli davranış ise  $\eta_T$  ile ifade edilir. Bu üç temel parametre kullanılarak, bir termo-elastik martenzitik dönüşüm için kritik dönüşüm sıcaklıkları  $M_s$ ,  $M_f$ ,  $A_s$  ve  $A_f$  şu şekilde ifade edilebilir.

$$M_s = T_o - \frac{1}{2}\eta_T \quad (1)$$

$$M_f = M_s - \Delta T \quad (2)$$

$$A_s = T_o + \frac{1}{2}\eta_T \quad (3)$$

$$A_f = A_s + \Delta T \quad (4)$$

Martenzitik dönüşümler, sıcaklık değişimine karşı duyarlı olduğu için faz dönüşümü, gerilmeye karşı duyarlı olmasından dolayı da mekanik bir işlem özelliği taşımaktadır. Geleneksel malzemelerde rastlanmayan bu termal-mekanik davranış, bu tür faz dönüşümlerine has termodinamik özellikler kazandırmaktadır. Bundan dolayı, şekil hafızalı alaşımların davranışlarını ifade edebilmek için, termodinamiğin temel kanunları kullanılarak bazı teoriler geliştirilmiştir. Şimdiye kadar geliştirilen teorilerin, iki temel yaklaşım üzerine kurulduğu söylenebilir. Birincisi Wollants ve arkadaşları tarafından geliştirilen denge termodinamik teorisi [11,20,21] ve ikincisi, Salzbranner ve Cohen [16,22–25] ile Ortin ve Planes [5,16] tarafından geliştirilen fenomenolojik termodinamik teorisidir. Bu çalışmada iki yaklaşımda ayrıntılı olarak incelenecektir.

## 2. TERMO-ELASTİK MARTENZİTİK DÖNÜŞÜMLERİN DENGE TERMODİNAMİK TEORİSİ (EQUILIBRIUM THERMODYNAMIC THEORY OF THERMO-ELASTIC MARTENSITIC TRANSFORMATION)

Bu teoride, termo-elastik martenzitik faz dönüşümleri gerçekleştiren itici güçler sıcaklık ve gerilmenin, dönüşüme olan etkisinin eşit olduğu düşüncesi temel oluşturmaktadır. Bu etkileri incelemek için Wollants ve arkadaşları [11], Şekil 6'da gösterilen şematik bir numune üzerinde enerji dengesini ifade etmeye çalışmışlardır. Şekildeki sistem tek eksenli çekme yükü ( $F$ ) altında oluşan gerilme etkisi ile deforme olmaktadır. Numunenin uzunluğu martenzitik dönüşüm nedeniyle  $L_o$ 'an  $L_o + \Delta L$ 'ye çıkmaktadır. Sistemin serbest enerji dengesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S - F\Delta L \quad (5)$$

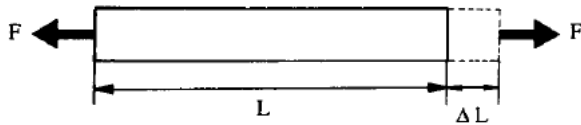
Denklemin sağ tarafı, deformasyon-dönüşüm işlemi ile ilgili tüm serbest enerji terimlerini içermektedir. Bunlardan  $\Delta H$  entalpi enerjisini,  $T\Delta S$  sıcaklık-entropi enerjisini ve  $F\Delta L$ 'de mekanik enerjiyi ifade etmektedir.  $\Delta H - T\Delta S$  terimi, tüm birinci düzen faz



dönüşümleri için geçerli genel serbest enerji terimidir ve yapı değişiminden kaynaklanır. Bazı kaynaklarda kimyasal serbest enerji ( $\Delta G_{ch}$ ) olarak ta ifade edilmektedir [27].  $F\Delta L$  terimi ise gerilme ile meydana gelen faz dönüşümüne ait mekanik enerjidir ve bazı kaynaklarda kimyasal olmayan serbest enerji ( $\Delta G_{nc}$ ) yada mekanik entropi ( $\Delta H_{mech}$ ) olarak da ifade edilmektedir. Bu mekanik enerjiyi aşağıdaki şekilde de ifade etmek mümkündür.

$$F\Delta L = V\sigma\varepsilon_t = \frac{1}{\rho}\sigma\varepsilon_t \quad (6)$$

Denklemdaki  $V$  özgül hacim,  $\rho$  malzemenin yoğunluğu,  $\sigma$  uygulanan gerilme ve  $\varepsilon_t$  ise gerçek birim şekil değişimini (strain) ifade etmektedir.



**Şekil 6.** Dış yük sonucu martenzitik dönüşüm ile deformasyon [11] (Deformation due to martensitic transformation by external force)

Bundan dolayı denklem 5, aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S - \frac{1}{\rho}\sigma\varepsilon_t \quad (7)$$

Denge durumunda ( $\Delta G = 0$ ) ise denklem 7, aşağıdaki gibi yazılabilir.

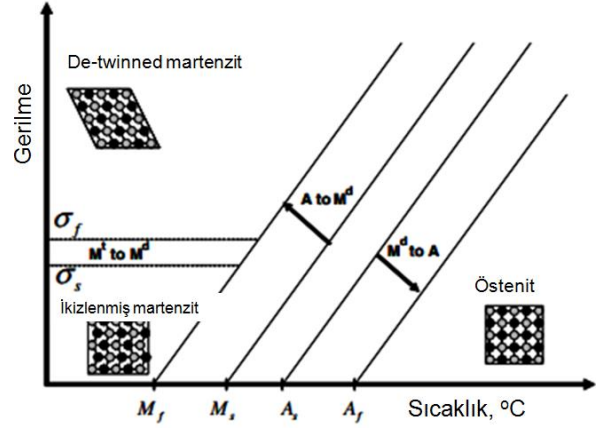
$$\Delta H - T_o\Delta S - \frac{1}{\rho}\sigma_o\varepsilon_t = 0 \quad (8)$$

Denklemdaki  $T_o$  ve  $\sigma_o$  sırasıyla faz dönüşümü için denge sıcaklığını ve denge gerilme değerlerini temsil eder. Bu denklemin türevi alınır;

$$\frac{d\sigma_o}{dT_o} = -\frac{\rho\Delta S}{\varepsilon_t} = -\frac{\rho\Delta H}{T_o(0)\varepsilon_t} \quad \text{denklemin elde edilir.}$$

Buradaki  $\Delta S = \frac{\Delta H}{T_o(0)}$  olarak ifade edilebilir [11]. Bu

denklemden yola çıkarak  $\Delta H$  ve  $\Delta S$  bulunabilirse, dönüşüm için gerilmesiz ortamdaki denge sıcaklığı  $T_o(0)$  bulunabilir [11,28]. Böylece, gerilme ve sıcaklık arasında doğrusal bir ilişki elde edilebilir. Bu ilişki literatürde sıkça kullanılan Clausius-Clapeyron bağıntısıdır ve Şekil 7 de şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 7.** Denge durumunda gerilme-sıcaklık arasındaki Clausius-Clapeyron ilişkisi [17] (Not: Alıntıdan tercüme edilmiştir.) (Clausius-Clapeyron relationship between stress-temperature in equilibrium state)

Clausius-Clapeyron bağıntısı, martenzitik faz dönüşümlerinde sıcaklık ve gerilmenin itici güç olarak eşit etkilere sahip olduğunu göstermektedir ve şimdiye kadar birçok deneysel veri ile doğrulanmıştır [29,30]. Bununla birlikte bu bağıntı ile ilgili birkaç noktanın vurgulanması gerekmektedir. Öncelikle bağıntı, denge durumundaki sıcaklık ve gerilme arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir [31]. Dolayısı ile bağıntıdaki ifadeler gerçek sıcaklık ve gerilme değerlerini yansıtmamaktadır. Gerçek değerler, bir tür malzeme iç özelliği olmayıp birçok metalürjik (tane büyüklüğü, çökelti, dislokasyon vb.) ve deney (yük uygulama frekansı, numune boyutları vb.) koşullarına göre değişebilmektedir [27].

Özetlemek gerekirse, termo-elastik martenzitik dönüşümlerin denge termodinamik teorisi serbest enerji dengesi ve faz dönüşümü için gerekli olan itici güçler sıcaklık ve gerilmenin dönüşüm işleminde eşit etkiye sahip olduğunu savunmaktadır. Bu teori sadece  $\Delta H$ ,  $\Delta S$ ,  $T_o$  ve  $\sigma_o$  gibi tersinir serbest enerji terimleri ile ilgilenebilir.

### 3. TERMOELASTİK MARTENZİTİK DÖNÜŞÜMLERİN FENOMONOLOJİK TERMODİNAMİK TEORİSİ (PHENOMENOLOGICAL THERMODYNAMIC THEORY OF THERMOELASTIC MARTENSITIC TRANSFORMATIONS)

Termo-elastik martenzitik faz dönüşümleri için geliştirilen fenomenolojik termodinamik teorisi, Şekil 5'de gösterilen ve faz dönüşümü sırasında gözlemlenen histerezisli davranıştan esinlenerek ortaya çıkmıştır. Dönüşüm sırasında gözlemlenen histerezis (ileri ve geri dönüşüm sıcaklıkları arasındaki fark), faz dönüşümünün tamamlanabilmesi için itici gücün sisteme sürekli ilave edilmesi gerektiğini ve buda malzemelerin içinde faz dönüşümüne karşı bir direncin olduğunu gösterir. Dönüşüme karşı gösterilen bu direnç iki yönlüdür ve hem

ileri hem de geri faz dönüşümlerinde gözlemlenir. Termo-elastik martenzitik dönüşümler için bu direncin nedeni depolanan ve geri salınan elastik şekil değişim enerjisi olarak ifade edilmektedir [11,19]. Böylece, termo-elastik martenzitik faz dönüşümü, değişik faktörler hesaba katılarak şu şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \Delta G_{total} &= \Delta G_c + \Delta G_{nc} \\ &= [\Delta H - T\Delta S] + [\Delta G_{el} + \Delta G_{irr}] \end{aligned} \quad (9)$$

Denkleme,  $\Delta G_{el}$  elastik şekil değişim enerjisini ifade etmektedir. Elastik şekil değişim enerjisi ileri faz dönüşüm sırasında depolanır ve malzemenin içyapısındaki martenzit hacim oranı arttıkça artar. Depolanan elastik şekil değişim enerjisi, geri dönüşüm sırasında martenzit hacim oranının azalması ile birlikte salınır ve bundan dolayı negatif işaret alır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta G_{el}^{A \rightarrow M} = -\Delta G_{el}^{M \rightarrow A} \quad (10)$$

Faz dönüşümü sırasında tersinir olmayan tüm enerjilerin toplamı yukarıdaki denkleme  $\Delta G_{irr}$  terimi ile ifade edilmiştir ve bu değer alaşım sistemine ve bu sistemin metalürjik özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Genelde dönüşüm sırasında bu değer sabit olduğu ve elastik enerji gibi martenzit hacim oranına göre değiştiği kabul edilir. Bu teoride ileri ve geri faz dönüşümleri için  $\Delta G_{irr}$  değerinin eşit olduğu varsayılır ve daima pozitif işaret alır.

$$\Delta G_{irr}^{A \rightarrow M} = \Delta G_{irr}^{M \rightarrow A} \quad (11)$$

Bu çıkarımlar ile  $\Delta G_{el}$  ve  $\Delta G_{irr}$  enerjilerinin martenzitik dönüşüm üzerindeki etkileri Şekil 8' de verilen grafikler ile açıklanabilir.

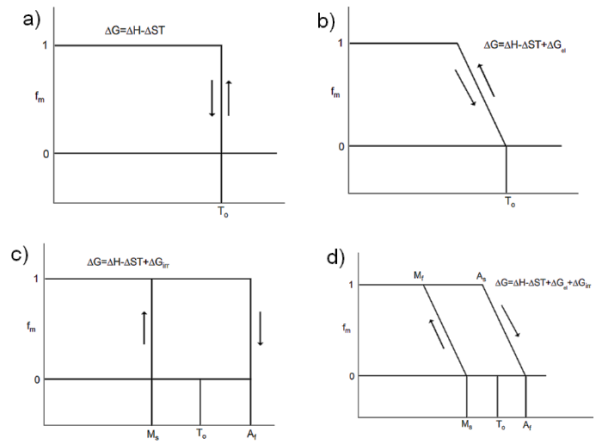
Şekil 8a, kimyasal serbest enerjinin ( $\Delta H - T\Delta S$ ), Şekil 8b,  $\Delta G_{el}$  enerjisinin, Şekil 8c  $\Delta G_{irr}$  enerjisinin ve Şekil 8d bu enerjilerin toplamının martenzitik dönüşüm üzerindeki etkilerini göstermektedir. Şematik gösterim hazırlanırken aşağıdaki kabuller ( $k$ =doğrusal sabit) yapılmıştır [19].

$$\Delta G_{el}(f_m = 0) = \Delta G_{el}(0) \neq 0 \quad (12)$$

$$\Delta G_{el}(f_m) = \Delta G_{el}(0) + kf_m \quad (13)$$

$$\Delta G_{irr}(f_m) = \Delta G_{irr} \quad (14)$$

Şekil 8'den de anlaşılacağı gibi  $\Delta G_{el}(f_m)$  dönüşüm aralığından ve  $\Delta G_{irr}$  dönüşüm histerezis değerinden sorumlu terimdir. Buradan hareketle  $\Delta G_{el}(f_m)$  ve  $\Delta G_{irr}$  değerlerinin deneysel olarak ölçülen dönüşüm histerezis değeri kullanılarak bulunabileceği anlaşılabilir.



Şekil 8.  $\Delta G_{el}$  ve  $\Delta G_{irr}$  enerjilerinin martenzitik dönüşüm üzerindeki etkilerinin şematik gösterimi (Schematic of the effects of  $\Delta G_{el}$  and  $\Delta G_{irr}$  energies on the martensitic transformation)

Görüldüğü gibi  $\Delta G_{el}$  ve  $\Delta G_{irr}$  terimleri martenzitik dönüşümlerin termodinamik analizlerinde çok önemli bir yer tutmaktadır. Dolayısı ile bu iki terimin anlaşılması, teoremin anlaşılması için oldukça önemlidir. Bunun üzerine yapılan değerlendirmeler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

### 3.1 Elastik Enerji

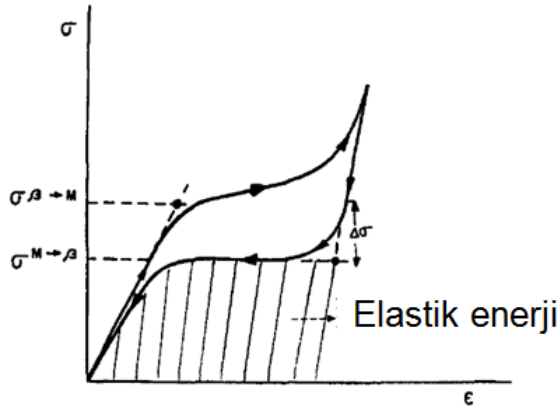
Denkleme 9'da ifade edilen  $\Delta G_{el}$  terimi, dönüşüme katkı sağlayan tüm tersinir enerjileri içerir. Ancak termo-elastik martenzitik dönüşümlerde, kafes yapısının deforme olması ile sistemde depo edilen elastik şekil değişim enerjisi çok etkili olduğundan, bu terim yerine elastik şekil değişim enerjisi kullanılabilir. İleri dönüşüm sırasında elastik şekil değişim enerjisi sistemde depolanır ve depolanan enerji geri faz dönüşümünde salınır [32,33]. Şekil hafızalı alaşımların süper-elastik davranışı sırasında sistemde depolanan elastik şekil değişim enerjisi Şekil 9'da gösterilmiştir.

Şekil 10'da,  $\Delta G_{el} = \frac{dG_{el}}{df_m}$  eşitliği ile ifade edilen bütün

çizgi, enerjinin dönüşen martenzit hacim oranının doğrusal bir fonksiyonu olarak değiştiğini göstermektedir. Grafikteki kesikli çizgi faz dönüşümü

boyunca depolanan  $G_{el} = \int_0^{f_m} \frac{dG_{el}}{df_m} df_m$  elastik enerjiyi

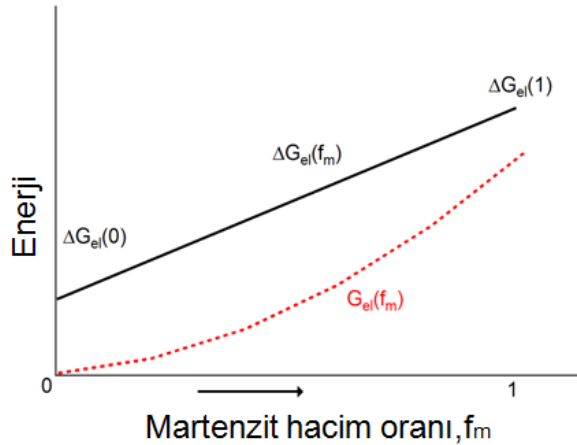
ifade etmektedir. Şematik gösterimden de anlaşılacağı gibi  $\Delta G_{el}(0)$  ileri faz dönüşümün başlangıç sıcaklığını ( $M_s$ ) değiştirmekte ve ileri-geri dönüşüm arasında sıcaklık farkı oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 9. Süper-elastik davranış deneyinde elastik enerjinin gösterimi [34] (Not: Alıntıdan tercüme edilmiştir.) (Elastic energy in a super-elastic curve)

### 3.2. Tersinir Olmayan Enerji

Termo-elastik martenzitik dönüşümlerde tersinir olmayan enerji terimi olan  $\Delta G_{irr}$ , birçok etken tarafından oluşturulabilir. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibidir.



Şekil 10. Elastik enerjinin martenzit hacim oranına göre değişimi (Change in elastic energy as a function of martensite volume fraction)

#### i) Malzemelerin iç yapısında oluşan hatalar

Martenzitik dönüşümlerin kafes yapısının deforme olması ile oluştuğu bilinmektedir. Bu deformasyon sırasında, malzemenin iç yapısında yerel olarak kalıcı olan plastik deformasyon görülebilir ve bunun sonucunda iç yapıda dislokasyon hataları oluşabilmektedir. Oluşan dislokasyonlar malzemenin iç enerjisini artırabilir ve aslında dönüşüm serbest enerjisinin de salınmasına neden olmaktadır. Bu enerji salınımı, bilindiği gibi tersinir değildir ve şimdiye kadar birçok deneysel veri ile doğrulanmıştır [19,35]. Örnek olarak, bazı şekil hafızalı alaşımlarda termal çevrim sonucunda malzeme iç yapısında dislokasyon

yoğunluğunun arttığı ve buna bağlı olarak dönüşüm sıcaklıklarının değiştiği gözlenmiştir [23,36,37].

#### ii) Sürtünme ısısı

Oluşan dislokasyonlar, malzemenin iç enerjisini artırmakla birlikte dönüşüm sırasında ilerleyen faz sınırını da engellemektedir. Hareketi engellenen faz sınırı, ilerleyebilmek için dislokasyonları itelemekte ve bazılarını kesmektedir. Bunun sonucu olarak ta sürtünme kaynaklı ısı açığa çıkmakta ve sistemin enerjisi salınmaktadır [38].

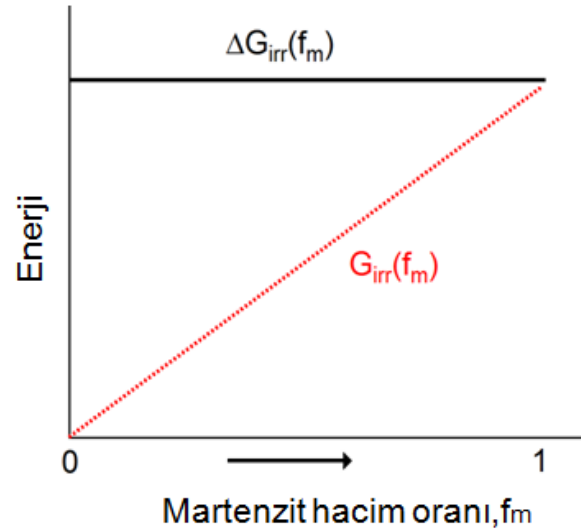
#### iii) Akustik emisyon

Martenzitik dönüşümler meydana gelirken malzemenin kafes yapısı deforme olur ve bunun sonucunda malzemede iç gerilmeler oluşabilir. Bu iç gerilmeler matrisin mekanik dayanımının üstünde bir değere ulaşırsa, martenzit fazı mekanik kafes dalgası olarak büyüyebilir. Bu büyüme bazı durumlarda ses hızında gerçekleşebilir ve etrafa akustik enerji salınabilir. Oluşan ses deney sırasında duyulabilir.

Salınan enerji dönüşüm sırasında gerekli olan itici gücün tükenmesine ve termal histerezis oluşumuna neden olur [5,11]. Dönüşüm boyunca salınan tüm özgül enerji

$$\Delta G_{irr} = \frac{dG_{irr}}{df_m}$$

sıcaklıklarının belirlenmesinde önemli rol oynar. Şekil 11'de tersinir olmayan enerjinin martenzit dönüşüm oranına göre değişim grafiği gösterilmiştir.



Şekil 11. Tersinir olmayan enerjinin martenzit hacim oranına göre değişimi (Change in irreversible energy as a function of martensite volume fraction)

Tersinir olmayan özgül enerji ( $\Delta G_{irr}$ ), ileri ve geri faz dönüşümleri için sabit kabul edilmektedir (Şekil 11). Salınan tüm enerji ( $G_{irr}$ ) dönüşüm sıcaklıkları ile doğrudan ilgili olmayıp, Şekil 11 deki gibi dönüşüm martenzit oranına bağlı olarak değişmektedir. Diğer taraftan, tersinir olmayan bu enerjiler termodinamik

olarak salınmasına rağmen faz dönüşümleri kristalografik ve mekanik olarak tersinir özelliğe sahiptir.

#### 4. FAZ DÖNÜŞÜM SICAKLIKLARININ TERMODİNAMİK İLE İFADE EDİLMESİ (EXPRESSION OF PHASE TRANSFORMATION TEMPERATURES VIA THERMODYNAMICS)

Termo-elastik martenzitik dönüşümleri açıklamak için birçok teorik çalışma yapılmasına rağmen, bu teorilerin gerçek deneyler yardımı ile uygulanması üzerinde yoğunlaşan bilimsel çalışmaların, teorik olanlar kadar fazla sayıda olmadığı söylenebilir. Bu konuda ilk çalışmalar Ortin ve Planes [13,26] tarafından yapılmıştır.

##### 4.1 Kritik Dönüşüm Sıcaklıkları

Yukarıda da bahsedildiği gibi tersinir olmayan enerji  $\Delta G_{irr}$ , termodinamik denklemlere dahil edildiği için, ileri ve geri dönüşüm için ayrı denklemlerin yazılması gerekmektedir. Diğer bir deyişle, ileri ve geri faz dönüşüm reaksiyonları için gerekli olan kritik şartlar eşit değildir. Bu faz dönüşümleri için gerekli denklemler şu şekilde yazılabilir [19].

$$\Delta G^{A \rightarrow M} = \Delta H^{A \rightarrow M} - T \Delta S^{A \rightarrow M} - \frac{1}{\rho} \sigma_{app} \varepsilon_t^{A \rightarrow M} + \Delta G_{el}^{A \rightarrow M}(f_m) + \Delta G_{irr}^{A \rightarrow M}(f_m) \quad (15)$$

$$\Delta G^{M \rightarrow A} = \Delta H^{M \rightarrow A} - T \Delta S^{M \rightarrow A} - \frac{1}{\rho} \sigma_{app} \varepsilon_t^{M \rightarrow A} + \Delta G_{el}^{M \rightarrow A}(f_m) + \Delta G_{irr}^{M \rightarrow A}(f_m) \quad (16)$$

Bu denklemlerde, S ve H durum fonksiyonudur. Bundan dolayı,

$$\Delta H^{A \rightarrow M} = -\Delta H^{M \rightarrow A} < 0 \quad (17)$$

ve

$$\Delta S^{A \rightarrow M} = -\Delta S^{M \rightarrow A} < 0$$

Eğer dönüşüm sırasında plastik deformasyon görülmez ise, ileri dönüşüm sırasında martenzit fazına dönüşen östenitin tamamı tekrar östenit fazına geri dönebilir. Bu durumda;

$$\varepsilon_t^{A \rightarrow M} = -\varepsilon_t^{M \rightarrow A} \quad (18)$$

Yapılan tanımlara göre, ileri dönüşüm sırasında depolanan elastik enerjinin tamamı geri dönüşümde tamamen salınır. Bu durumda;

$$\Delta G_{el}^{A \rightarrow M}(f_m) = -\Delta G_{el}^{M \rightarrow A}(f_m) > 0 \quad (19)$$

Tersinir olmayan enerji durum fonksiyonu olmadığından, değeri gerçek faz dönüşüm koşullarına ve malzemenin metalurjik yapısına bağlı olarak değişir. Genel olarak serbest enerjinin salınımı şeklinde tarif edilebilir ve ileri ve geri faz dönüşüm fonksiyonları için eşit kabul edilir.

$$\Delta G_{irr}^{A \rightarrow M}(f_m) = \Delta G_{irr}^{M \rightarrow A}(f_m) > 0 \quad (20)$$

Bu koşullar altında ve malzeme üzerine uygulanan kuvvetin  $\sigma_{app} = 0$  olması durumunda ileri ve geri faz dönüşümleri kritik sıcaklıklar aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta G^{A \rightarrow M} = \Delta G^{M \rightarrow A} = 0$$

$$T^{A \rightarrow M}(f_m) = \frac{\Delta H^{A \rightarrow M} + \Delta G_{el}^{A \rightarrow M}(f_m) + \Delta G_{irr}^{A \rightarrow M}(f_m)}{\Delta S^{A \rightarrow M}} \quad (21)$$

$$T^{M \rightarrow A}(f_m) = \frac{\Delta H^{M \rightarrow A} + \Delta G_{el}^{M \rightarrow A}(f_m) + \Delta G_{irr}^{M \rightarrow A}(f_m)}{\Delta S^{M \rightarrow A}} \quad (22)$$

$f_m = 0$  ise

$$T^{A \rightarrow M}(0) = M_s = \frac{\Delta H^{A \rightarrow M} + \Delta G_{el}^{A \rightarrow M}(0) + \Delta G_{irr}^{A \rightarrow M}(0)}{\Delta S^{A \rightarrow M}} \quad (23)$$

$$T^{M \rightarrow A}(0) = A_f = \frac{\Delta H^{M \rightarrow A} + \Delta G_{el}^{M \rightarrow A}(0) + \Delta G_{irr}^{M \rightarrow A}(0)}{\Delta S^{M \rightarrow A}} \quad (24)$$

$f_m = 1$  ise

$$T^{A \rightarrow M}(1) = M_f = \frac{\Delta H^{A \rightarrow M} + \Delta G_{el}^{A \rightarrow M}(1) + \Delta G_{irr}^{A \rightarrow M}(1)}{\Delta S^{A \rightarrow M}} \quad (25)$$

$$T^{M \rightarrow A}(1) = A_s = \frac{\Delta H^{M \rightarrow A} + \Delta G_{el}^{M \rightarrow A}(1) + \Delta G_{irr}^{M \rightarrow A}(1)}{\Delta S^{M \rightarrow A}} \quad (26)$$

Yukarıda türetilmiş denklemler, anlık olarak özgül elastik ve tersinir olmayan enerji tarafından etkilenmiş bir faz dönüşüm reaksiyonunun kritik dönüşüm sıcaklıklarını göstermektedir.

##### 4.2. Dönüşüm Sıcaklık Farkları

İleri ve geri faz dönüşüm reaksiyonları için dönüşüm sıcaklık aralıkları aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta T^{A \rightarrow M} = M_s - M_f = \frac{[\Delta G_{el}^{A \rightarrow M}(0) - \Delta G_{el}^{A \rightarrow M}(1)]}{\Delta S} + \frac{[\Delta G_{irr}^{A \rightarrow M}(0) - \Delta G_{irr}^{A \rightarrow M}(1)]}{\Delta S} \quad (27)$$

$$\Delta T^{M \rightarrow A} = A_f - A_s = \frac{[\Delta G_{el}^{M \rightarrow A}(0) - \Delta G_{el}^{M \rightarrow A}(1)]}{\Delta S} + \frac{[\Delta G_{irr}^{M \rightarrow A}(0) - \Delta G_{irr}^{M \rightarrow A}(1)]}{\Delta S} \quad (28)$$

Yukarıdaki denklemler, faz dönüşümünün başlangıç ve bitiş zamanlarında özgül elastik ve tersinir olmayan

enerjilerin aynı olmamasından kaynaklanan sıcaklık farklarını göstermektedir.

Diğer taraftan, östenit ve martenzit arasındaki kimyasal

denge sıcaklığı  $T_o = \frac{\Delta H}{\Delta S}$  olarak ifade edilmektedir

[28,39]. Dönüşümün başlangıç anında, ileri ve geri faz dönüşümleri arasındaki medyan sıcaklık ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$T_{1/2} = \frac{1}{2} (A_f - M_s) \quad (29)$$

$$= \frac{1}{2} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta H^{M \rightarrow A} + \Delta G_{el}^{M \rightarrow A}(0) + \Delta G_{irr}^{M \rightarrow A}(0)}{\Delta S^{M \rightarrow A}} \\ - \frac{\Delta H^{A \rightarrow M} + \Delta G_{el}^{A \rightarrow M}(0) + \Delta G_{irr}^{A \rightarrow M}(0)}{\Delta S^{A \rightarrow M}} \end{array} \right\}$$

Daha önce bahsedilen 17,19 ve 20 Denklemleri ile ifade edilen kabuller yapılırsa, medyan sıcaklık denklemi

$$T_{1/2} = \frac{\Delta H^{A \rightarrow M} + \Delta G_{el}^{A \rightarrow M}(0)}{\Delta S^{A \rightarrow M}} \text{ haline gelmektedir.}$$

Bu durumda  $T_{1/2} < T_o$  olduğu unutulmamalıdır. Buna benzer çıkarımlar daha önce farklı araştırmacılar tarafından da yapılmıştır. Bunun bir açıklaması, dönüşümün başlaması için gereken ekstra enerji olabilir. Sisteme ekstra enerji sağlamak için malzeme aşırı soğutulur ve buda  $T_{1/2}$  sıcaklığının  $T_o$  altına düşmesine neden olmuş olabilir [19].

### 4.3. Dönüşüm Sırasındaki Termal Histerezis

Faz dönüşümü sırasında farklı enerji gereksinimlerinden ötürü, kritik sıcaklıklar arasında fark görülür, buna termal histerezis denir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\eta_T = T^{M \rightarrow A}(f_m) - T^{A \rightarrow M}(f_m)$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta H^{M \rightarrow A} + \Delta G_{el}^{M \rightarrow A}(f_m) + \Delta G_{irr}^{M \rightarrow A}(f_m)}{\Delta S^{M \rightarrow A}} \\ - \frac{\Delta H^{A \rightarrow M} + \Delta G_{el}^{A \rightarrow M}(f_m) + \Delta G_{irr}^{A \rightarrow M}(f_m)}{\Delta S^{A \rightarrow M}} \end{array} \right\} \quad (30)$$

$$= \frac{-2\Delta G_{irr}^{A \rightarrow M}(f_m)}{\Delta S^{A \rightarrow M}}$$

Bu eşitlik literatürde bilinen bir denklemdir. Bununla beraber denklem kullanılırken  $\Delta G_{irr}(f_m)$  ifadesinin, malzeme sabiti olmadığı ve dönüşümün özelliklerine ve metalürjik yapıya göre değişebileceği göz ardı edilmemelidir.

## 5. DÖNÜŞÜM ISILARI (TRANSFORMATION HEATS)

Daha önceki bölümlerde yapılan dönüşüm sıcaklıkları yorumlarına ek olarak, şekil hafızalı alaşımların faz dönüşümlerinde üzerinde durulması gereken bir diğer konu; dönüşüm sırasında etrafa salınan ısı enerjisidir. Bu ısı, dönüşüm gösteren malzeme sistemi ile çevre arasında

gerçekleşir. Bu ısının gelişimini anlamak, entalpi ve entropi gibi termodinamik parametrelerin bulunması ve yorumlanması için oldukça önemli bir yere sahiptir. Özellikle şekil hafızalı alaşımların davranışlarının anlaşılmasında, Clausius-Clapeyron bağıntısının yorumlanması ve gerilme ile meydana gelen martenzitik dönüşüm sırasında açığa çıkan ısı enerjisi gibi kavramların anlaşılmasında, bahsedilen ısı değişim kavramı kullanılır.

Daha öncede belirtildiği gibi, şekil hafızalı alaşımlarda görülen faz dönüşümlerinde kimyasal olmayan serbest enerjiler de dönüşüm reaksiyonunun bir parçasıdır. Bundan dolayı bu dönüşümlerde görülen ısı enerjisi sadece entalpi değişimine bağlı değildir. Bu nedenle, dönüşüm sırasında malzeme ve çevre arasında oluşan enerji değişiminin daha geniş bir şekilde ifade edilmesi gerekmektedir.

$$dG_{total} = dG_{ch} + dG_{nc} \quad (31)$$

$$= dH - TdS + dG_{el}(f_m) + dG_{irr}(f_m)$$

Denklemdaki son terim ( $dG_{irr}(f_m)$ ), dönüşüm sırasında dislokasyon oluşumu sırasında harcanan enerji, faz sınırının hareketi ile oluşan sürtünmeye harcanan enerji ve akustik emisyon gibi salınan tüm enerjileri ifade etmektedir. Bu yorum ile beraber, salınan enerjileri, alınan ısı  $G_{irr,q}$  ve yapılan iş  $G_{irr,w}$  olarak ikiye ayırmak mümkün olabilir. Böylece salınan enerji denklemi  $dG_{irr}(f_m) = dG_{irr,q}(f_m) + dG_{irr,w}(f_m)$  haline gelebilir.

Dönüşümün sanki-dengeli devam ettiği düşünülür ise (bu durum iki farklı hali ele aldığı için termodinamik açıdan denge durumu olarak adlandırılmaz),  $dG^{A \rightarrow M} = 0$  ya da  $dG^{M \rightarrow A} = 0$  olur. Bu durumda;

$$dH - TdS + dG_{el}(f_m) + dG_{irr,q}(f_m) + dG_{irr,w}(f_m) = 0 \quad (32)$$

Bu denklemde  $TdS$  ve  $dG_{irr,q}(f_m)$  ısı terimleridir.

Bundan dolayı

$$dq = TdS - dG_{irr,q}(f_m) = dH + dG_{el}(f_m) + dG_{irr,w}(f_m)$$

olarak ifade edilebilir. Faz dönüşümü sırasında,  $0 \rightarrow f_m$  arası depolanan toplam ısı birim kütle için aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$Q(f_m) = \int_0^{f_m} dq = \int_0^{f_m} dH + dG_{el}(f_m) + dG_{irr,w}(f_m)$$

$$= \int_0^{f_m} \Delta H df_m + \int_0^{f_m} \Delta G_{el}(f_m) df_m + \int_0^{f_m} \Delta G_{irr,w}(f_m) df_m$$

$$= \Delta H f_m + G_{el}(f_m) + G_{irr,w}(f_m) \quad (33)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $G_{el}(f_m)$  ve  $G_{irr,w}(f_m)$  terimleri,  $0 \rightarrow f_m$  arası faz dönüşümü sırasında depolanan ve ısı ile ilgili olmayan elastik enerjileri ifade etmektedir. Bundan dolayı  $G_{el}(0) = 0$  ve  $G_{irr,w}(0) = 0$  olarak yazılması daha uygundur.

Faz dönüşümü tamamlandığında ( $f_m = 1$ ), ısı denklemi  $Q = \Delta H + G_{el}(1) + G_{irr,w}(1)$  halini alır.

Görüldüğü gibi, martenzitik dönüşümlerdeki ısı enerjisi sadece entalpi değil, üç farklı enerjinin toplamı şekline ifade edilebilir. İleri ve geri faz dönüşümleri için ısı etkileri eşitlik şeklinde yazacak olursak;

$$A \rightarrow M : Q^{A \rightarrow M} = \Delta H^{A \rightarrow M} + G_{el}^{A \rightarrow M}(1) + G_{irr,w}^{A \rightarrow M}(1) \quad (34)$$

$$M \rightarrow A : Q^{M \rightarrow A} = \Delta H^{M \rightarrow A} + G_{el}^{M \rightarrow A}(1) + G_{irr,w}^{M \rightarrow A}(1) \quad (35)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $Q^{A \rightarrow M}$  ekzotermik ısıyı ve  $Q^{M \rightarrow A}$  ise endotermik ısıyı ifade etmektedir. Bundan dolayı  $Q^{A \rightarrow M} < 0$  ve  $Q^{M \rightarrow A} > 0$  şeklinde ifade edilebilir. Bununla birlikte  $G_{el}^{A \rightarrow M}(1) = -G_{el}^{M \rightarrow A}(1) > 0$  ve  $G_{irr,w}^{A \rightarrow M}(1) = G_{irr,w}^{M \rightarrow A}(1) > 0$  olarak ifade edilebilir. Daha önce  $\Delta H^{A \rightarrow M} = -\Delta H^{M \rightarrow A} < 0$  şeklinde olduğu eşitlik 17 ile ifade edilmişti. Tamamlanmış bir faz dönüşümü için ısı kaybı ifadesi ise

$$\Delta Q = Q^{A \rightarrow M} + Q^{M \rightarrow A} = 2G_{irr,w} \quad (36)$$

olarak yazılabilir.

Böylece, ileri ve geri faz dönüşümleri için toplam ısı ifadesi aşağıdaki son halini alır.

$$Q^{M \rightarrow A} - Q^{A \rightarrow M} = 2\Delta H^{M \rightarrow A} + 2G_{el}^{A \rightarrow M} \quad (37)$$

$$G_{el} = \Delta H - \frac{1}{2}(Q^{M \rightarrow A} - Q^{A \rightarrow M}) \quad (38)$$

Denklem 36, dönüşüm sırasında meydana gelen ısı kaybının (DSC gibi termal analiz yöntemleri ile ölçülebilir) tersinir olmayan enerji ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Denklem 38 ise dönüşüm sırasında depolanan elastik enerjinin, entalpi ve ısı değerlerini kullanarak tahmin edilebileceğini göstermektedir.

## 6. TERMO-ELASTİK MARTENZİTİK FAZ DÖNÜŞÜMLERİ İÇİN TERMODİNAMİK TEORİLERİN GENELLEŞTİRİLMESİ (GENERALIZATION OF THERMODYNAMIC THEORIES FOR THERMOELASTIC MARTENSITIC PHASE TRANSFORMATIONS)

Denklem 39'daki serbest enerji dengesi, yalnızca kimyasal serbest enerjiye yük-şekil değişiminden gelen enerji eklenerek sağlanmaktadır. Bununla beraber, birçok farklı etkenin faz dönüşümlerindeki serbest enerji dengesini değiştirebileceği bilinmelidir. Bundan dolayı, Wollants ve arkadaşları termodinamik teorilerini genel bir halde ifade etmiştir. Termodinamiğin birinci yasasını kullanarak aşağıdaki genellemeler yapılabilir [11].

$$dU = \delta Q + \delta W \quad (39)$$

Yukarıdaki denklemde  $\delta W$ , dönüşümdeki ısı ile ilgili olmayan tüm enerji terimlerini kapsamaktadır. Dönüşümlerin serbest enerji denklemi en genel hali ile aşağıdaki gibi yazılabilir [11-20].

$$G = U - \sum X_i Y_i \quad (40)$$

Bu denklemde  $\sum X_i Y_i$  terimi sıcaklık-entropi enerjisi, basınç-hacim enerjisi, manyetik enerji ve yük-birim şekil değişim enerjisi gibi iç enerji dışındaki enerjilerin toplamını ifade etmektedir. Dolayısı ile sabit sıcaklık, yük ya da manyetik alan uygulanması gibi durumlarda [40], birinci-düzen bir faz dönüşümü için serbest enerji ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta G = \Delta U - \sum \Delta X_i Y_i = \Delta U - T\Delta S + P\Delta V - F\Delta L - H\Delta M - \dots \quad (41)$$

Denge halinde ( $\Delta G = 0$ ), yukarıdaki denklemi her parametreye göre türetirsek, farklı Clausius-Clapeyron eşitlikleri elde etmek mümkün olur. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibi yazılabilir [11,27].

$$\left. \frac{\partial P}{\partial T} \right|_{H,F} = \frac{\Delta S}{\Delta V} \quad (42)$$

$$\left. \frac{\partial F}{\partial T} \right|_{H,P} = -\frac{\Delta S}{\Delta L} \quad (43)$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial T} \right|_{F,P} = -\frac{\Delta S}{\Delta M} \quad (44)$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial F} \right|_{T,P} = -\frac{\Delta L}{\Delta M} \quad (45)$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial P} \right|_{T,F} = \frac{\Delta V}{\Delta M} \quad (46)$$

Yukarıdaki denklemlere göre, faz dönüşümü hacim değişimi içeriyor ise sıcaklığı hidrostatik basıncın fonksiyonu olarak değişebilir. Eğer faz dönüşümü lineer bir boyut değişimi geçirmiş ise sıcaklığı uygulanan yük tarafından denklem 43’ de gösterildiği gibi etkilenir. Eğer dönüşüm manyetizasyon değişimi içeriyor ise sıcaklığı denklem 44 ile ifade edildiği gibi manyetik alan tarafından değiştirilebilir.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (RESULTS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, termo-elastik martenzitik faz dönüşümlerinin fonksiyonel davranışlarını açıklamak için kullanılan termodinamik teorileri, denge termodinamik teorisi ve fenomenolojik termodinamik teorisi olarak iki ana başlık altında incelenmiştir. Literatürde yapılan analizler ile şekil hafızalı alaşımların karakterize edilmesinde kullanılabilecek sade ve anlaşılır matematiksel ifadeler elde edilmiştir. Örneğin, basit bir diferansiyel taramalı kalorimetre ile yapılabilecek termal analiz ile faz dönüşüm sıcaklıkları bulunduktan sonra ve mekanik deneyler ile elde edilebilecek gerilme-sıcaklık (Clausius-Clapeyron) diyagramında kullanılarak, faz dönüşümüne ait entalpi, entropi, elastik enerji, salınan enerji gibi termodinamik parametrelere ulaşmak mümkün olabilmektedir. Analizler daha ileriye götürülür ise termodinamik parametreler ile malzemelerin içyapıları arasında ve dolayısı ile mekanik davranışları arasında bağlantılar kurulabilir. Örnek vermek gerekir ise şekil hafızalı alaşımlarda içyapıda bulunan çökeltilerin boyutuna göre, faz dönüşümü sırasında salınan enerji miktarı değişebilmektedir. İçyapı özelliklerinin (dislokasyon yoğunluğu, çökeltilerin boyutu vb.) malzemenin termodinamik parametrelerini değiştirdiği bilinmektedir ancak bu değişim henüz matematiksel olarak ifade edilebilmiş değildir. Araştırmacıların yönelebileceği bir konu da bu ilişkilerin anlaşılması olabilir. Eğer bu yapılabilir ise önceden malzemelerin içyapısına bakarak termodinamik özellikleri tahmin edilebilir. Buda malzemelerin dönüşüm sıcaklıkları ve ısıları hakkında bizlere fikir verebilir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Wayman, C.M. and Otsuka, K. *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press, (1998).
- [2] Acar, E., Ozbulut, O.E. and Karaca, H.E. “Experimental investigation and modeling of the loading rate and temperature dependent superelastic response of a high performance shape-memory alloy,” *Smart Mater. Struct.*, 24; 7, 75020, (2015).
- [3] Karaca, H.E., Acar, E., Ded, G.S., Saghalian, S.M., Basaran, B., Tobe, H., Kok, M., Maier, H.J., Noebe, R.D. and Chumlyakov, Y.I. “Microstructure and transformation related behaviors of a Ni<sub>45.3</sub>Ti<sub>29.7</sub>Hf<sub>20</sub>Cu<sub>5</sub> high temperature shape memory alloy,” *Mater. Sci. Eng. A*, 627; 82–94, (2015).
- [4] Karaca, H.E., Acar, E., Basaran, B., Noebe, R.D., Bigelow, G., Garg, A., Yang, F., Mills, M.J. and Chumlyakov, Y.I. “Effects of aging on [111] oriented NiTiHfPd single crystals under compression,” *Scr. Mater.*, 67; 7, 728–731, (2012).
- [5] Karaca, H.E., Acar, E., Ded, G.S., Basaran, B., Tobe, H., Noebe, R.D., Bigelow, G., and Chumlyakov, Y.I. “Shape memory behavior of high strength NiTiHfPd polycrystalline alloys,” *Acta Mater.*, 61; 13, 5036–5049, (2013).
- [6] Lin, H.C., Wu, S.K., Chou, T.S. and Kao, H.P. “The effects of cold rolling on the martensitic transformation of an equiatomic TiNi alloy,” *Acta Metall. Mater.*, 39; 9, 2069–2080, (1991).
- [7] Acar, E., Karaca, H.E., Tobe, H., Noebe, R.D. and Chumlyakov, Y.I. “Orientation dependence of the shape memory properties in aged Ni<sub>45.3</sub>Ti<sub>29.7</sub>Hf<sub>20</sub>Pd<sub>5</sub> single crystals,” *Intermetallics*, 54; 60–68, (2014).
- [8] Karaca, H.E., Acar, E., Basaran, B., Noebe, R.D. and Chumlyakov, Y.I. “Superelastic response and damping capacity of ultrahigh-strength [111]-oriented NiTiHfPd single crystals,” *Scr. Mater.*, 67; 5, 447–450, (2012).
- [9] Acar, E., Tobe, H., Kaya, I., Karaca, H.E. and Chumlyakov, Y.I. “Compressive response of Ni<sub>45.3</sub>Ti<sub>34.7</sub>Hf<sub>15</sub>Pd<sub>5</sub> and Ni<sub>45.3</sub>Ti<sub>29.7</sub>Hf<sub>20</sub>Pd<sub>5</sub> shape-memory alloys,” *J. Mater. Sci.*, 50; 4, 1924–1934, (2015).
- [10] Liu, Y. and Yang, H. “The concern of elasticity in stress-induced martensitic transformation in NiTi,” *Mater. Sci. Eng. A*, 260; 1, 240–245, (1999).
- [11] Wollants, P., Roos, J.R. and Delaey, L. “Thermally- and stress-induced thermoelastic martensitic transformations in the reference frame of equilibrium thermodynamics,” *Prog. Mater. Sci.*, 37; 3, 227–288, (1993).
- [12] McCormick, P.G. and Liu, Y. “Thermodynamic analysis of the martensitic transformation in NiTi—II. Effect of transformation cycling,” *Acta Metall. Mater.*, 42; 7, 2407–2413, (1994).
- [13] Ortín, J. and Planes, A. “Thermodynamic analysis of thermal measurements in thermoelastic martensitic transformations,” *Acta Metall.*, 36; 8, 1873–1889, (1988).
- [14] Acar, E. “Precipitation, orientation and composition effects on the shape memory properties of high strength NiTiHfPd alloys,” *University of Kentucky*, (2014).
- [15] Kaya, I., Tobe, H., Karaca, H.E., Acar, E. and Chumlyakov, Y.I. “Shape Memory Behavior of [111]-Oriented NiTi Single Crystals After Stress-Assisted Aging,” *Acta Metall. Sin. English Lett.*, 29; 3, 282–286, (2016).
- [16] Tong, H.C. and Wayman, C.M. “Characteristic temperatures and other properties of thermoelastic martensites,” *Acta Metall.*, 22; 7, 887–896, (1974).
- [17] Lagoudas, D.C. and Kumar, P.K. “Introduction to Shape Memory Alloys,” in *Shape Memory Alloys*, Springer, 1–51, (2008).
- [18] Tong, H.C. and Wayman, C.M. “Thermodynamics of thermoelastic martensitic transformations,” *Acta Metall.*, 23; 2, 209–215, (1975).
- [19] Liu, Y. “Thermodynamics of the shape memory effect

- in Ti–Ni alloys,” in *Shape memory Alloys for Biomedical Applications*, T. Y. and S. Miyazaki, Ed. Woodhead Publishing, (2009).
- [20] Wollants,P., Roos, J.R. and Delaey,L. “On the stress-dependence of the latent heat of transformation as related to the efficiency of a work performing cycle of a memory engine,” *Scr. Metall.*,14;11,1217–1223, (1980).
- [21] Wollants,P., De Bonte, M. and Roos,J.R. “Comments on ‘The transformation free energy in ordered Fe3Pt,’” *Scripta Metallurgica*, 17; 5. Pergamon, 671–672, (1983).
- [22] Salzbrenner,R.J. and Cohen,M. “On the thermodynamics of thermoelastic martensitic transformations,” *Acta Metall.*, 27;5,739–748, (1979).
- [23] Olson,G.B. and M. Cohen, M.“Thermoelastic behavior in martensitic transformations,” *Scr. Metall.*, 9;11,1247–1254, (1975).
- [24] Salzbrenner,R.J. and Cohen,M. “On the thermodynamics of thermoelastic martensitic transformations,” *Acta Metall.*, 27;5,739–748, (1979).
- [25] Khalil-Allafi,J., Dlouhy,A. and Eggeler,G. “Ni4Ti3-precipitation during aging of NiTi shape memory alloys and its influence on martensitic phase transformations,” *Acta Mater.*, 50;17,4255–4274, (2002).
- [26] Ortín,J. and Planes,A. “Thermodynamics of thermoelastic martensitic transformations,” *Acta Metall.*, 37;5,1433–1441, (1989).
- [27] Liu,Y. and McCormick,P.G. “Thermodynamic analysis of the martensitic transformation in NiTi—I. Effect of heat treatment on transformation behaviour,” *Acta Metall. Mater.*,42; 7, 2401–2406, (1994).
- [28] Wayman,C.M. and Tong,H.C. “On the equilibrium temperature in thermoelastic martensitic transformations,” *Scr. Metall.*, 11; 5,341–343, (1977).
- [29] Stachowiak,G.B. and McCormick,P.G., “Shape memory behaviour associated with the R and martensitic transformations in a NiTi alloy,” *Acta Metall.*, 36; 2, 291–297, (1988).
- [30] Stachowiak,G.B. and McCormick, P.G.“Two stage yielding in a NiTi alloy,” *Scr. Metall.*, 21;3, 403–406, (1987).
- [31] Kakeshita, T.,Saburi,T. and Shimizu, K.“Effects of hydrostatic pressure and magnetic field on martensitic transformations,” *Mater. Sci. Eng. A*, 273;21–39, (1999).
- [32] Zhang,S. and McCormick,P.G. “Thermodynamic Analysis of Shape Memory Phenomena — II. Modelling,” *Acta Mater.*, 48;12,3091–3101, (2000).
- [33] Zhang,S. and McCormick,P.G. “Thermodynamic analysis of shape memory phenomena — I. Effect of transformation plasticity on elastic strain energy,” *Acta Mater.*, 48; 12, 3081–3089, (2000).
- [34] Mur, G., Javier,F. “Friction and stored elastic energy in Cu-Zn-Al single crystals with pseudoelastic behaviour,” *Thermochim. Acta*, 290;2,167–171, (1997).
- [35] Acar, E.,Karaca,H.E., Basaran, B.,Yang,F., Mills,M. J., Noebe, R.D. and Chumlyakov,Y.I. “Role of aging time on the microstructure and shape memory properties of NiTiHfPd single crystals,” *Mater. Sci. Eng. A*, 573;161–165, (2013).
- [36] Acar, E.,Karaca,H.E., Tobe,H., Noebe,R.D. and Chumlyakov,Y.I. “Characterization of the shape memory properties of a Ni45.3Ti39.7Hf10Pd5 alloy,” *J. Alloys Compd.*, 578; 297–302, (2013).
- [37] Karaca, H.E.,Saghaian,S.M., Tobe, H.,Acar, E.,Basaran, B.,Nagasako,M., Kainuma,R. and Noebe,R.D. “Diffusionless phase transformation characteristics of Mn75.7Pt24.3,” *J. Alloys Compd.*, 589; 412–415, (2014).
- [38] Nishida,M.,Wayman,C.M. and Honma,T. “Precipitation processes in near-equiatomic TiNi shape memory alloys,” *Metall. Trans. A*, 17;9, 1505–1515, (1986).
- [39] Tong,H.C. and Wayman,C.M. “Some stress-temperature-energy relationships for thermoelastic martensitic transformations,” *Scr. Metall.*, 8;2,93–100, (1974).
- [40] Shimizu,K. and Kakeshita,T. “Effect of Magnetic Fields on Martensitic Transformations in Ferrous Alloys and Steels,” *ISIJ Int.*, 29; 97–116, (1989).





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

**Eşit miktarda filament kullanımını ile 3 boyutlu baskısı yapılacak ankastre kirişlerin çekme/basma mukavemetine göre kesit geometrilerinin belirlenmesi**

*Determination of cross sectional geometries of beams according to tension and compression strength which are 3D printed with the same amount of filament*

*Yazar(lar) (Author(s)): Murat Tolga ÖZKAN<sup>1</sup>, Hüseyin Alp ÇETİNDAG<sup>2</sup>, İhsan TOKTAŞ<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-4371-1836*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-8467-7646*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-4371-7836*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Özkan M.T., Çetindağ H.A., ve Toktaş İ., “Eşit miktarda filament kullanımını ile 3 boyutlu baskısı yapılacak ankastre kirişlerin çekme/basma mukavemetine göre kesit geometrilerinin belirlenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 213-219, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.385559

# Eşit Miktarda Filament Kullanımı ile 3 Boyutlu Baskısı Yapılacak Ankastre Kirişlerin Çekme/Basma Mukavemetine Göre Kesit Geometrilerinin Belirlenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Murat Tolga ÖZKAN<sup>1\*</sup>, Hüseyin Alp ÇETİNDAG<sup>2</sup>, İhsan TOKTAŞ<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 13.04.2017 ; Kabul/Accepted : 17.05.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada, aynı kesit alanlı ve uzunluktaki, eşit miktarlardaki filament kullanımı ile 3 boyutlu baskısı yapılacak ankastre kirişlerin çekme/basma mukavemeti yönünden en iyi mekaniksel özelliği sağlayan kesit geometrilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Böylelikle, hızlı modelleme ve plastik parçaların üretiminde sıkça kullanılan filamentin miktarına göre, üretim zamanı ve harcanan enerjiden bağımsız olarak, tasarımlar arasında performansa göre bir sıralama yapılmıştır. Ankastre kirişlerin tasarımların uzunluğu ve uygulanan kuvvetler sabit tutulmuş, içi dolu temel kesit geometrisi biçimleri (Çember, dikdörtgen, eşkenar üçgen, paralel kenar, elips ve köşeleri yuvarlatılmış dikdörtgen) değiştirilmiştir. Ayrıca, dört farklı filament malzemesi, çekme/basma mukavemeti yönünden karşılaştırılmıştır. 6 kesit şekline, 101 kesit alanına ve 4 farklı malzemeye bağlı olarak toplam 2424 adet tasarım alternatifi oluşturulmuştur. Bu tasarım alternatifleri, önce matematiksel olarak modellenmiş, sonra sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve regresyon analizi ile test edilmiştir. Tüm modellerin istatistiksel analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, en düşükten büyüğe doğru gerilmelere ve deformasyonlara uğrayan kesit geometrisi biçimleri sıralanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Filament, ankastre kiriş, çekme/basma, optimizasyon.

## Determination of Cross Sectional Geometries of Beams According to Tension and Compression Strength Which are 3D Printed with the Same Amount of Filament

### ABSTRACT

Aim of this study is to specify the performance of cross sectional geometries of beams which were experienced the tension stress. These beams which were 3D printed with the same amount of filament have same cross sectional area, length and volume. . Thus, design points were sorted without the effect of the amount of filament, printing time and energy consumption. Geometry of cross section was changed. In contrary length of beams and applied forces were kept constant for all design points. These geometries were selected as, circle, rectangle, equilateral triangle, rhombus (diamond), ellipse and rounded rectangle. Moreover four different printing material were taken into consideration for comparison according to tension. Depending on 6 different cross sectional geometry, 101 cross sectional area and 4 different material, 2424 design alternative were created in total. At the beginning mathematical model of these designs were constructed, then they were tested by using finite element method (FEM) and regression analysis. All model branches were compared to each other with the statistical analysis. As a result of all analyses, design alternatives were sorted according to stress and deformation performance.

**Keywords:** Filament, beam, bending, optimization.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kesit şekli ve malzeme cinsi, üretilecek ürünün gerilme ve gerinim değerlerini etkilemektedir. Bu yüzden kullanılan malzeme miktarına bağlı kalmadan kesit geometrisine göre bir dayanıklılık sıralamasının yapılması gerekmektedir. Literatürde farklı kesit

tiplerine göre ayrı ayrı yapılmış çalışmalar mevcut olmakla birlikte, kesit geometrisi ve eşit miktarda malzeme kullanımına göre bir dayanıklılık sıralama yapılmamıştır. Bu çalışmanın özgünlüğü eşit miktarda malzeme kullanarak, zorlanma şiddetine bağlı olarak çekme mukavemeti ve boyca uzama değerlerine dayalı malzeme cinsine göre kesit sıralaması yapılmasıdır.

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : mtozkan06@yahoo.com

Günümüzde 3B baskı ve yazıcılar, özellikle ağır sanayiler dışındaki ofislerimizde RP'ye (Rapid Prototype) kolay bir yol desteklemekte ve bize farklı malzeme türüne izin vermektedir. Mücevher, ayakkabı, endüstriyel tasarım, mimarlık, otomotiv, havacılık, dişçilik ve tıbbi endüstriler gibi birçok farklı alan bu tekniği kullanmaya başladı [1]. En önemli uygulamalardan bir tanesi, tasarım geliştirme ve tıbbi modellerin imalatıdır ve bunun sayesinde cerrahi planlamadan önce sanal ve fiziksel anatomik modellerin üretimi amaçlanmaktadır [2,3]. Katkı imalatı veya 3D baskı, şirketlerin şu ana kadar imkânsız olduğu düşünülen şekillerin üretimine izin vererek ürünler üretme biçiminde devrim meydana getirdi. Bu, malzemelerin yük koşulları altında en iyi performans için gerekli olan kesin konumlara yerleştirilmiş parçaları tasarlamının avantajını sağlar. Bununla birlikte, bu teknoloji ağırlık-performans perspektifinden faydalanırken, sonlu elemanlar analizi ve performans öngörülerini için ayrıştırılması zor olan oldukça karmaşık şekillere neden olur. Bu zorluk, açık çözümlerin tipik olarak kullanıldığı bileşen arızaları gibi son derece doğrusal olmayan olayları tahmin ederken daha da belirginleşti. Geleneksel olarak, benzer elemanlar için tetrahedral elemanlara kıyasla daha yüksek doğruluk ve daha düşük simülasyon maliyetlerinden ötürü açık altı çözümlerde altı yüzlü elemanlar kullanılır. Bununla birlikte, topoloji optimizasyonu ile üretilen oldukça karmaşık şekiller, altı yüzlü elemanlar kullanılarak örgü yapmak kesinlikle yasaktır. Dolayısıyla rijitlik ve daha

özel olarak mukavemet sayısal tahmini, 3D baskılı parçalar için zorlu bir önerme haline gelir [4,5]. Farklı bir çalışmada, dolgu deseni seçiminin ve çeşitli mekanik özelliklerin maliyet ve üretim sürelerinin belirlenmesi için tasarım parametrelerini belirlenmesi hedeflemiştir. Bunun için farklı zorlanmalar için deneysel ve FEA analizleri yapılmıştır [7]. Bu çalışma, 3D yazıcı aracılığıyla üretilecek olan kırılgardaki, çekme gerilmesiyle zorlanan elemanların sonlu elemanlar yöntemi ve analitik çözüm aracılığıyla elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve regresyon analizinin yapılması ile özetlenebilir. Bu sayede kullanılan malzeme ve harcanan enerjiden bağımsız olarak daha sağlam tasarımlar elde edilmiş olacaktır.

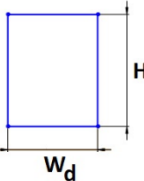
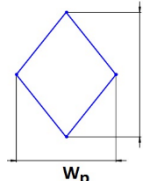
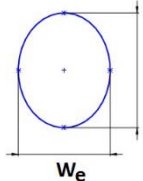
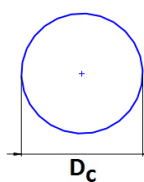
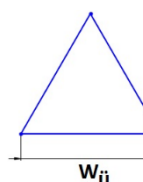
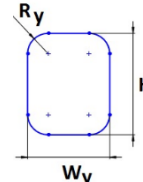
## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

### 2.1. Tasarımların Hazırlanması (Preparation of Design Points)

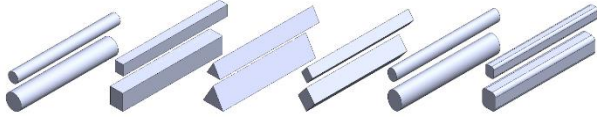
Kıyaslamalarda kullanılması için üç ana şekil (Çember, Dikdörtgen, Eşkenar Üçgen) seçilmiş, daha sonra bunlara ek olarak Paralelkenar, Elips ve Yuvarlatılmış Dikdörtgen de hesaplama ve analizlerde göz önünde bulundurulmuştur. Parametrik tasarım yapılabilmesi adına bu şekilleri oluşturan ölçüler arasında bağlantı kurulmuş ve çalışma boyunca bu ilişkiler bozulmamıştır. Elde edilen bu oranlar Çizelge 1 de gösterilmiştir.

Seçilen bu kesitlerin giriş uzunlukları 20 mm olarak sabit tutulmuş, kesit alanları ise 3 mm<sup>2</sup> den 8 mm<sup>2</sup> ye kadar

Çizelge 1. Seçilen kesit geometrileri ve bu şekillere ait ölçüler (Selected cross section geometries and their dimensions)

Dikdörtgen		Paralelkenar		Elips	
	$H_d / W_d = 1,5$		$H_p / W_p = 1,5$		$H_e / W_e = 1,5$
	$H_d$ : min: 1,936 mm, max: 3,162 mm		$H_p$ : min: 2,739 mm, max: 4,472 mm		$H_e$ : min: 2,185 mm, max: 3,568 mm
	$W_d$ : min: 1,549 mm, max: 2,530 mm		$W_p$ : min: 2,191 mm, max: 3,578 mm		$W_e$ : min: 1,748 mm, max: 2,855 mm
Çember		Üçgen (eşkenar)		Yuvarlatılmış Dikdörtgen	
	$D_ç$ : min: 1,954 mm, max: 3,192 mm		$W_ü$ : min: 2,632 mm, max: 4,210 mm		$H_y / W_y = 1,5$
			$W_y / R_y = 4$		
			$H_e$ : min: 1,979 mm, max: 3,232 mm		
			$W_e$ : min: 1,584 mm, max: 2,586 mm		
			$R_y$ : min: 0,396 mm, max: 0,646 mm		

arttırılmıştır. Bu sayede 101 adet kesit alanı elde edilmiştir. Çalışmada yer alan en büyük ve en küçük kesit alanına sahip tasarımlar Şekil 1 de gösterilmiştir.



**Şekil 1.** Çember, dikdörtgen, eşkenar üçgen, paralelkenar, elips ve yuvarlatılmış dikdörtgen şeklindeki kesitlere sahip tasarımlar. Kesit alanı üstte 3 mm<sup>2</sup>, altta ise 8 mm<sup>2</sup>'dir. (Circular, rectangular, triangle, rhomboid, ellipse and rounded rectangle cross sections of models. Cross sectional area of the models are 3 mm<sup>2</sup> at the top and 8 mm<sup>2</sup> at the bottom)

Altı adet kesit geometrisi ve 101 adet kesit alanı kullanılarak elde edilen 606 tasarım, 3D yazım tekniğinde kullanılan ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), PLA (Polylactic Acid), PETG (Polyethylene terephthalate glycol-modified) ve PC (Polycarbonate) malzemeleri için de tekrar edilmiş, böylelikle toplam 2424 adet çözüm noktası oluşturulmuştur. ABS ve PLA, 3D yazıcılarda sıkça kullanıldığı için tercih edilmiş. Malzeme çeşitliliğini arttırmak için ise PETG ve PC de analizlere dahil edilmiştir. Kullanılan bu malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 2 de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.** Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri (Mechanical properties of the materials used)

	Elastikiyet Modülü	Poisson's Oranı	Özkütle -ρ-
ABS	2250 MPa	0,35	1,05 g/cm <sup>3</sup>
PLA	3500 MPa	0,36	1,24 g/cm <sup>3</sup>
PETG	2100 MPa	0,4	1,27 g/cm <sup>3</sup>
PC	2206 MPa	0,37	1,21 g/cm <sup>3</sup>

## 2.2. Analizlerin Yürütülmesi (Conduction of analyses)

Elde edilen bütün tasarımlar aynı kuvvet altında analiz edilmiştir. 10 N büyüklüğündeki bu kuvvet bir uçtan giriş

eksenine paralel uygulanmıştır. Diğer uç ise sabit destek olarak seçilmiştir. Öncelikle genel mukavemet formülleri kullanılarak hesaplamalar yapılmış, sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve regresyon analizi kullanılarak doğrulanmıştır. Yapılan bu çalışmalar istatistiksel olarak karşılaştırılarak, mukavemet yönünden güçlü tasarımların saptanması amaçlanmıştır.

### 2.2.1. Analitik hesaplama (Analytical calculation)

Çekme gerilmesi Denklem (1), gerinme ve uzama ise sırasıyla Denklem (2) ve Denklem (3) yardımıyla bulunabilir [8].

$$\sigma_T = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta L_z}{L} = \frac{\sigma_z}{E} = \frac{F}{E.A} \quad (2)$$

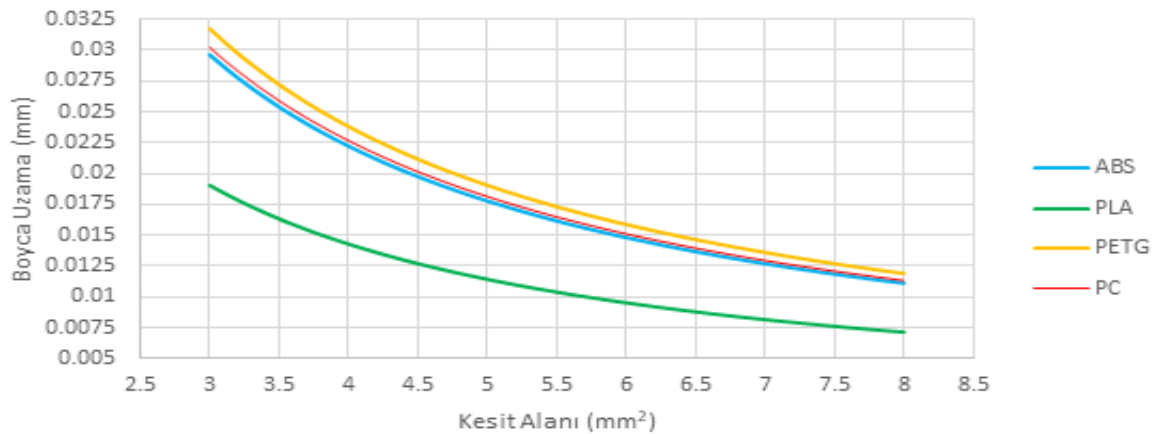
$$\Delta L_z = \frac{F.L}{A.E} \quad (3)$$

Burada  $\sigma_T$  ortaya çıkan çekme gerinmesini, F uygulanan kuvveti, A kesit alanını,  $\varepsilon_z$  z-ekseni boyunca gerinmeyi, L kirişin uzunluğunu, E ise elastikiyet modülünü ifade etmektedir. Bu hesaplamalarda şekilden ziyade kesit alanı ve malzeme cinsi önemlidir. Hesaplamalar sonucunda elde edilen grafik Şekil 2'de gösterilmiştir.

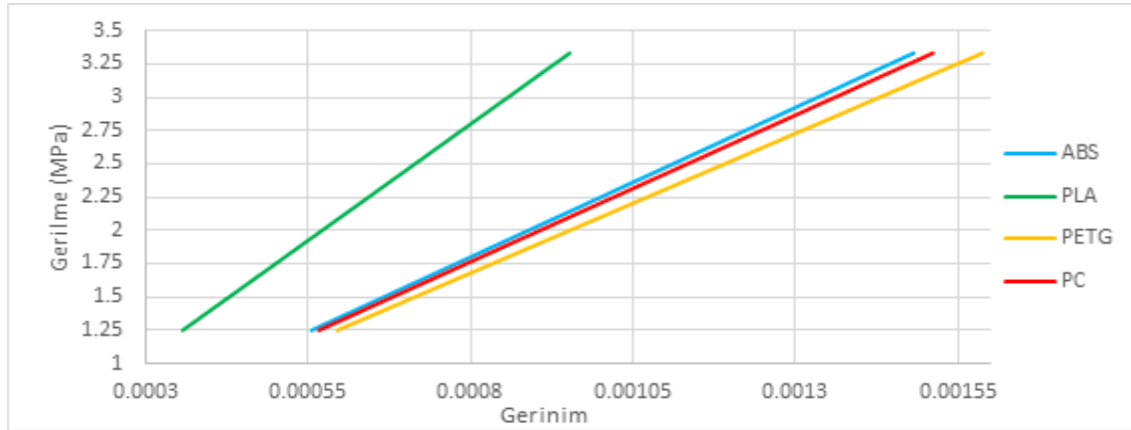
Dört farklı malzeme (ABS, PLA, PETG ve PC (Polycarbonate) için çekme yüklemesine karşı uzama değerleri elde edilmiştir. Kesit alanlarına göre uzama değerleri Şekil 2 de gösterilmiştir. En fazla uzamalar sırasıyla PETG, PC, ABS ve en az uzamayı ise PLA göstermiştir. Yüklemeler sonucunda elde edilen Gerilme-Gerinim grafiğine bakılacak olursa aynı gerilmeye karşın ABS, PLA, PETG nin daha çok şekil değiştirdiği, PLA nın ise uzama değerinin diğer malzemelere göre daha az olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 3).

### 2.2.2. Sonlu elemanlar yöntemi (Finite element method)

Katı modeli oluşturulan tasarımlar ANSYS "Static Structural" modülü kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analizlerin ilk adımını "mesh" optimizasyonu oluşturmaktadır. Mesh boyutu, mesh sayısı ve mesh



**Şekil 2.** Seçilen malzemeler için kesit alanının boyca uzamaya etkisi (Influence of the selected materials on the elongation)



Şekil 3. Seçilen malzemeler için gerilmenin gerinime etkisi (Influence of the stress on the strain for selected materials)

oluşturma metodları değiştirilerek sonuçların analitik hesaplamalara uyması sağlanmıştır. Uygun mesh kalitesi elde edildikten sonra, parametrik tasarım yardımıyla bütün modeller sistematik bir şekilde analiz edilmiştir. Analizlerde kirişin bir ucuna yüzeye yayılmış bir şekilde 10 N'luk kuvvet, öbür uca ise sabit destek (fixed support) uygulanmıştır. Sonuçlar iki kısımda değerlendirilmiştir. İlk olarak gerilme ( $\sigma_T$ ) ve gerinimlerin ( $\epsilon$ ) doğrusal olduğu kirişin orta kısmı incelenmiş, daha sonra ise parça genelinde ortaya çıkan gerilme deformasyon ve gerinimler dikkate alınmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kirişlerdeki boyca uzamanın ve kirişlerin ortasındaki gerilmelerin analitik olarak elde edilen sonuçlara çok yakın olduğu görülmektedir. Bu iki yöntemle elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve aradaki sapmanın belirlenmesi için istatistiksel analizden yararlanılmıştır;

$$RMS = \left( \frac{1}{p} * \sum_j |t_j - o_j|^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

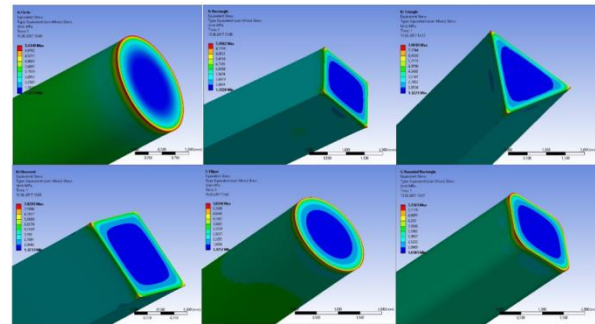
$$R^2 = 1 - \left( \frac{\sum_j (t_j - t_j)^2}{\sum_j o_j^2} \right) \quad (5)$$

$$Ort. \% Hata = \frac{\sum_j \left( \frac{t_j - o_j}{t_j} * 100 \right)}{p} \quad (6)$$

3 eşitlik ( Denklem 4-6) kullanılarak deformasyon, gerilme ve gerinim sapmaları bulunmuştur. Kesit alanı, kesit geometrisi veya malzeme gözetmeksizin yapılan bu hesaplamalar sayesinde sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerin doğruluğu belirlenmiştir. Bunun

“R<sup>2</sup>” değerinin 1'e yakın olması ve “Ort % Hata” değerinin ise düşük değerlerde olması gerekmektedir. Bu kıstaslar göz önünde bulundurulduğunda yapılan sonlu elemanlar analizinin çok yüksek bir doğruluğa sahip olduğu görülmektedir.

Kirişlerin bütünü ele alındığında, en yüksek gerilme değerlerinin kuvvet uygulanan yüzey veya kirişin orta noktasından ziyade kirişin sabitlendiği bölgede ortaya çıktığı görülmüştür. Bu yüksek gerilmeler Şekil 4 de gösterilmiştir.



Şekil 4. Kirişler üzerinde oluşan gerilme yığılmaları (Stress concentrations on the beams)

### 2.2.3. Regresyon analizi (Regression analysis)

Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilenler incelendiğinde, sabit destek bölgesinde oluşan gerilmeler dışında bütün verilerin sonuca bağlandığı görülmektedir. Bu yüzden gerilmeleri analiz etmek için regresyon

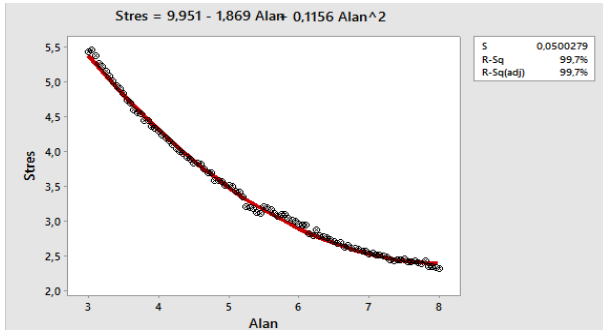
Çizelge 3. Boyca uzama, kirişlerin ortasındaki gerinme, gerilme hesaplamaları için analitik çözüm ve sonlu elemanlar yöntemi arasındaki sapma değerleri (Deviation between analytical calculations and the finite element method for Elongation, Stress and Strain on the mid-section of the beams)

	RMS	R <sup>2</sup>	Ort. % Hata	Min. Sapma (%)	Maks. Sapma (%)
Boyca uzama	0,0000928600	0,9999994683	0,5571897631	0,361980544	0,841342285
Gerinim	0,0000000066	1,0000000000	0,0004394443	0,0000000918	0,009812653
Gerilme	0,0000172179	0,9999999998	0,0004400554	0,0000000023	0,009818793

yanında herhangi bir tasarımda ortaya çıkan en büyük ve en küçük sapmalar da saptanmıştır. Elde edilen bu değerler Çizelge 3 te verilmiştir. “RMS” değerinin 0'a,

tekniki kullanılmıştır. Regresyon analizinde çıktılar gerilme, girdiler ise kesit alanı olarak belirlenmiştir. Model olarak İkinci derece regresyon seçilmiş,

güvenilirlik seviyesi %95 olarak belirlenmiştir. Şekil 5 te dairesel şekle sahip kiriş için yapılan bu analiz her kesit şekli için tekrarlanmıştır.



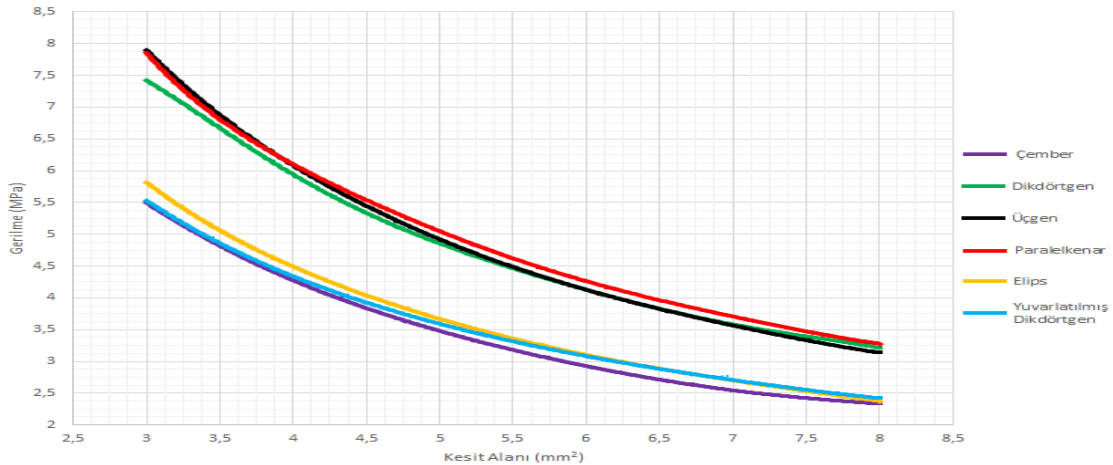
Şekil 5. Dairesel alana sahip kirişte, gerilme yığılması olan bölgeler için yapılan regresyon analizi sonucu (Regression analysis of the stress concentrations for the circular beam)

Altı farklı kesit alanı için yapılan regresyon analizi sonuçları Çizelge 4 te gösterilmiştir.

Çizelge 4. Regresyon analizi sonucu elde edilen denklemler ve katsayılar.  $\sigma$  = gerilme, A = kesit alanı (Obtained equations and values from the regression analysis.  $\sigma$  = Stress, A = cross sectional area)

	Denklemler	$R^2$	S
Çember	$\sigma = 9,951 - (1,869 A) + (0,1156 A^2)$	0,997	0,0500279
Dikdörtgen	$\sigma = 13,21 - (2,375 A) + (0,1423 A^2)$	0,998	0,0478153
Üçgen	$\sigma = 14,18 - (2,644 A) + (0,1601 A^2)$	0,997	0,0679506
Paralelkenar	$\sigma = 13,47 - (2,383 A) + (0,1403 A^2)$	0,997	0,0665050
Elips	$\sigma = 10,27 - (1,885 A) + (0,1139 A^2)$	0,997	0,0544872
Yuvarlatılmış Dikdörtgen	$\sigma = 9,567 - (1,703 A) + (0,1026 A^2)$	0,997	0,0489894

Şekilde görüldüğü üzere sonuçlar iki bölgeye ayrılmıştır. Birinci grupta keskin köşeli şekiller (dikdörtgen, üçgen,



Şekil 6. Kesit şekline göre kesit alanı ve ortaya çıkan en yüksek gerilmeler arasındaki ilişki (Relation between cross sectional area and the stress concentrations according to cross sectional geometry)

paralelkenar) 3-8 MPa aralığında gerilmeye maruz kalırken, ikinci grup olan yumuşak hatlara sahip kesitler (çember, elips, yuvarlatılmış dikdörtgen) yalnızca 2,25-6 MPa aralığındaki gerilmelere uğramıştır. İkinci grubun daha az gerilmesinin en büyük sebebi Şekil 4 ten de görülebileceği üzere, kuvvetin belirli noktalara yığılması yerine kesit üzerine yayılmasıdır. Çember, elips ve yuvarlatılmış dikdörtgenin uygulanan kuvvete göre daha sağlam bir yapıda olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

### 3. SONUÇ (CONCLUSION)

Oluşturulan bütün tasarımlar için öncelikle analitik metot ve sonlu elemanlar yöntemi istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada RMS değerlerinin 0'a,  $R^2$  değerlerinin 1 e çok yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca ortalama yüzde hata değerleri ise boyca uzama, gerilme ve gerilme değerleri için sırasıyla 0,5571897631, 0,0004394443 ve 0,0004400554 olarak bulunmuştur. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda iki yöntem arasındaki hatanın çok düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

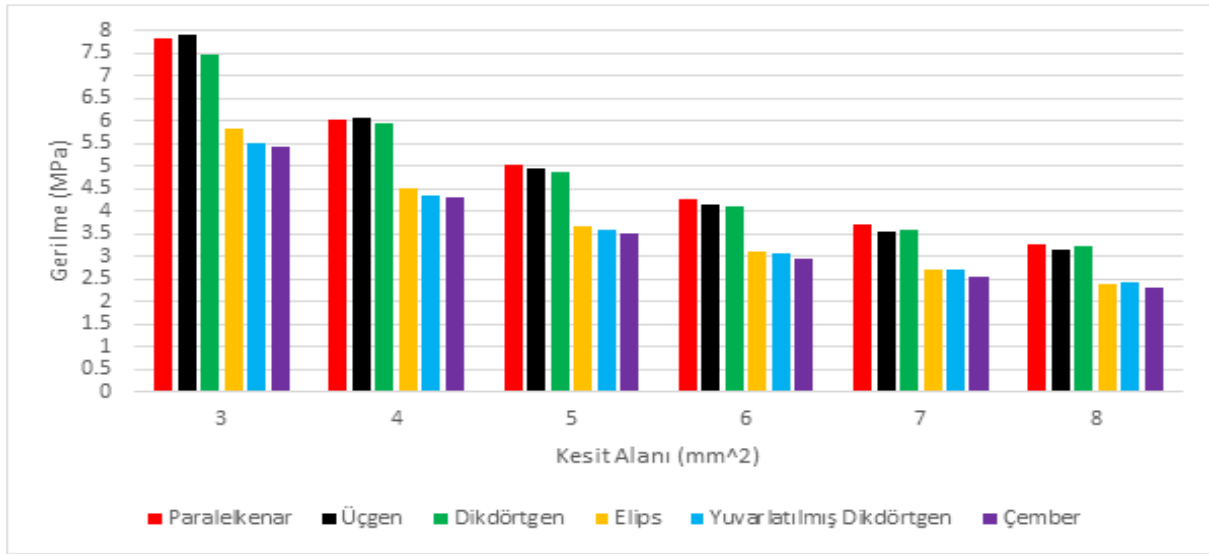
İstatistiksel analiz yardımıyla doğruluğu kesinleşen sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, bağlantı noktalarında oluşan gerilme yığılmaları incelenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen değerler regresyon analizi yardımıyla yorumlanarak grafiğe dönüştürülmüştür. Yapılan regresyon analizinde  $R^2$  değeri 0,997'dir. Regresyon analizi sonunda ise kesit şekline bağlı olarak, kesit alanı ve oluşan maksimum gerilme arasındaki ilişkiyi tanımlayan denklemler elde edilmiştir.

Kesitler arasında çembersel şeklin diğerlerinden daha etkili olduğu Şekil 6 da açıkça görülmektedir. Bu şeklin diğerlerine göre ne kadar etkili olduğunu belirlemek için regresyon analizinde de kullanılan sonlu elemanlar yönteminin sonuçları kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen en yüksek gerilme ve boyca uzama değerlerinin ortalaması alınarak çembersel kesitle karşılaştırılmıştır. Bu kıyaslama sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 5 te gösterilmiştir.

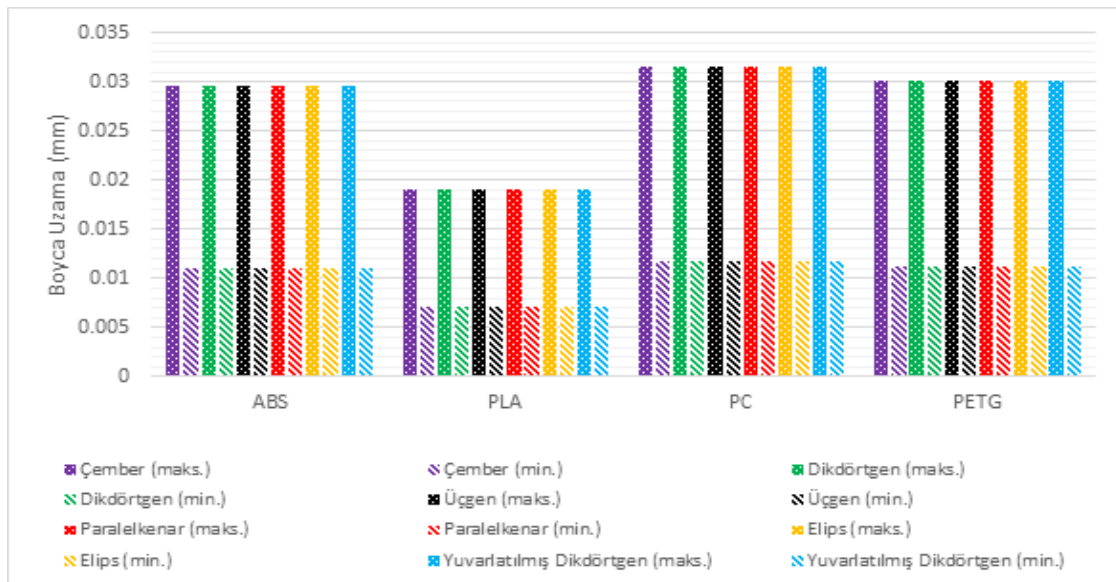
**Şekil 5.** Çembersel kesitin, en yüksek gerilme ve boyca uzama değerleri için diğer kesitlere göre performansı (Comparison of circular section and the other cross sectional geometries according to stress concentration and elongation)

	Maks Gerilme Farkı (%)	Boyca Uzama Farkı (%)
Dikdörtgen	-39,34419527	+0,019003236
Eşkenar Üçgen	-41,22062292	+0,035586458
Paralelkenar	-43,83863799	+0,029140353
Elips	-5,336441278	+0,015808902
Yuvarlatılmış Dikdörtgen	-3,267299548	+0,006244358

kaldığı görüldüyse de boyca uzama miktarında çok önemli bir değişme olmamıştır. Kesitler arasındaki gerilme farkları Şekil 7’de daha net olarak görülebilmektedir. Şekil 8’de ise malzeme cinsine göre kırışlerde meydana gelen en büyük ve en küçük uzamalar gösterilmiştir. Sonuç olarak yapılan tüm çalışma göz önünde bulundurduğunda, en iyi performansı PLA malzemesinden üretilen çembersel kesitin sergilediği görülmektedir. En kötü sonuçlar ise PC’den üretilen paralelkenar kesitine sahip tasarımda ortaya çıkmıştır. Böylelikle kullanılan malzeme miktarına bağlı kalmadan oluşan gerilmelere bakılarak tasarımlar arasında



**Şekil 7.** 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 mm<sup>2</sup> kesit alanları için tasarımlar üzerinde oluşan gerilme yığılımları (Stress concentrations for 3, 4, 5, 6, 7 and 8 mm<sup>2</sup> cross sectional areas)



**Şekil 8.** Malzeme cinsine göre kırışlerde meydana gelen en büyük ve en küçük uzamalar (Maximum and minimum deformations according to material type)

Çizelgeye bakıldığında çembersel kesitin diğer kesitlere göre kayda değer miktarda daha az gerilmeye maruz

mukavemet yönünden sıralama yapılabilmektedir. Bu sayede tasarımlar arasında %43,8 e varan performans kazanımları sağlanmıştır.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Biggins P, Hiltz J, Kusterbeck A. Bio-inspried Materials and Sensing Systems. *Cambridge*: RSC Pub; (2011).
- [2] Milovanović J, Trajanović M. Medical applications of rapid prototyping, *Mechanical Engineering*, 5: 79– 85, (2007).
- [3] Gibson I. Advanced Manufacturing Technology for Medical Applications: Reverse Engineering. Software Conversion and Rapid Prototyping. West Sussex:*John Wiley & Sons*; (2005).
- [4] Subhransu Mohapatra, Prasad Dasappa Numerical Prediction of Stiffness and Strength of a Highly Complex Topology Optimized Thermoplastic Part designed for 3D Printing SPE ANTEC™ Indianapolis 2016.
- [5] Lars Krog, A. T. Application of Topology, Sizing and Shape Optimization Methods to Optimal Design of Aircraft Components. Retrieved from Altair product design 2011.
- [6] Baich, Liseli, and Guha Manogharan. "Study of infill print parameters on mechanical strength and production cost-time of 3D printed ABS parts." *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX. (2015).
- [7] M. Iliesu E. Nuțu, B. Comănescu Applied Finite Element Method Simulation in 3D Printing, *International Journal Of Mathematics And Computers In Simulation*, 2(4): 305-312, (2008)
- [8] Russell C. Hibbeler, *Mechanics Of Materials*, Pearson Education Canada, (2011).
- [9] ANSYS Manual.





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

## 3D printing for tissue engineering applications

*Yazar(lar) (Author(s)): Askican HACIOGLU<sup>1</sup>, Hakan YILMAZER<sup>2</sup>, Cem Bulent USTUNDAG<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-2843-4102*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-5602-4966*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-4439-0878*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Hacıoğlu A., Yılmaz H. Ve Ustundag C. B., “3D printing for tissue engineering applications”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 221-227, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.389596

# 3D Printing for Tissue Engineering Applications

*Derleme Makalesi / Review Article*

**Askican HACIOGLU<sup>1</sup>, Hakan YILMAZER<sup>2</sup>, Cem Bulent USTUNDAG<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Yildiz Technical University, Department of Bioengineering, Istanbul 34220, Turkey

<sup>2</sup> Yildiz Technical University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Istanbul 34220, Turkey

(Received : 08.05.2017 ; Accepted : 19.06.2017)

## ABSTRACT

The goal of tissue engineering is to create functional tissues and organs for regenerative therapies, and total organ transplantation. Bioprinting tissues are one of the most attractive approaches for tissue engineering and regenerative medicine fields. Fabrication of a complex structure via bioprinting requires layer-by-layer fabrication strategy. Bioprinting is mainly based on three processes; imaging and computer aided the design of the tissue that we wanted to print, the production of bio-ink with the selection of proper substances, the choice of a proper bioprinter depending on the product that we want, for fabrication of scaffold and/or tissues. In recent years the 3D bioprinting technology has been developed and several approaches appear by the researchers. The approaches are biomimicry, autonomous self-assembly and mini-tissue building blocks. In this study, current and future potential applications of 3D printing for the tissue engineering and regenerative medicine will be discussed.

**Keywords: Bioprinter, bioink, self-assembly, biomimicry, tissue engineering**

## 1. INTRODUCTION

Creating functional tissues and organs and total organ replacement are the ultimate targets of tissue engineering for regenerative therapies. The most common tissue engineering strategy is to seed cells onto scaffolds, which can then direct cell proliferation and differentiation into three-dimensional (3D) functioning tissues. Synthetic and natural polymers have been used to produce various tissues. To be successful in this challenge, these materials must be biocompatible and biodegradable. Also, such materials having the proper mechanical strength have been used to support cell attachment, proliferation, and direct cell differentiation. Even though the research and clinical applications achieved significant success in the past years, it is obvious that due to their complex 3D structure, the organs require more precise multi-cellular structures with vascular network integration, which cannot be generated by conventional methods [1]. One of the most promising techniques to develop the field of tissue engineering and regenerative medicine is the usage of 3D bioprinters to produce artificial tissues and organs.

In 3D bioprinting, the layer-by-layer accurate positioning of biological materials, chemical materials, and living cells, with positional control of functional components, is used to fabricate 3D structures. There are several approaches to 3D bioprinting; biomimicry, autonomous self-assembly and mini-tissue building blocks. Researchers are developing these approaches and using them co-operatively to fabricate 3D functional living human constructs with proper biological and mechanical properties for the clinical restoration of tissue and organ function [2].

Biomimicry is the solution for complex human problems with the imitation of the models, systems, and elements

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : cbustun@yildiz.edu.tr, cbustundag@gmail.com

of nature. Identical reproductions of the cellular and extracellular components of a tissue or organ are the application of biomimicry to the 3D bioprinting.

Autonomous self-assembly is the approach which is using embryonic organ development as a guide to copy a tissue. The early cellular components of a developing tissue produce their own extracellular matrix (ECM) components, proper cell signaling and autonomous organization and patterning to produce the desired biological micro-architecture and function [3].

The concept of mini-tissues is relevant to biomimicry and self-assembly strategies for 3D bioprinting. The mini-tissues by design and/or self-assembly can build larger constructs can be fabricated and assembled.

## 2. IMAGING & DESIGNING TISSUES

For printing out complex functional tissues, organs, it is very important to model these in an accurate way. The visualization techniques have been developed in time, and medical 3D visualization methods reached the accuracy of isualization an organ in details in a realistic scale. Medical imaging technologies provide the data on 3D structure and function at the cellular, tissue, organ and organism levels. Computer-aided design (CAD) and computer-aided manufacturing tools are providing collection and digitization with the complex architectural information for tissues and organs. It can also be modified or designed, with the benefits of the usage of computer-aided design tools, on demand. Much current imaging and diagnostic technologies, such as magnetic resonance imaging (MRI) and computer tomography (CT), have been explored to acquire information about the targeting tissues and achieve the CAD data of the grafts.

The CT imaging is based on the variable absorption of X-rays by different tissues. MRI also can provide high

spatial resolution in soft tissue via using nuclear magnetic resonance. The contrast of biological structures can be strongly increased with the use of contrast agents. As contrast agents, while the barium or iodine are used for CT scans; the iron oxide, gadolinium or metalloproteins are used for MRI scans; [4].

After raw imaging data have been obtained from these imaging methods, the data must be processed to produce 2D cross-sectional images [5]. 3D anatomical representations can be produced for further analysis or modification. The 3D CAD models can be separated into 2D horizontal slices to provide instructions to the bioprinter and direct the layer-by-layer depositions of the biological elements [2]. Modeling tissue for 3D printing is shown in Fig. 1.

A custom nozzle motion program is used for fabrication to adjust XYZ movement of nozzles, scan speed, temperature, air pressure and material information [6].

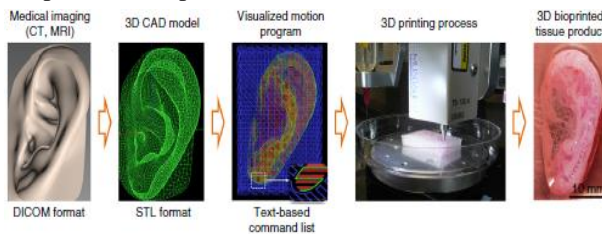


Figure 1. Modelling tissue for 3D printing [6].

### 3. BIOPRINTERS

There are mainly 3 strategies to produce a 3D tissue by bioprinting:

#### 3.1. Ink-Jet Bioprinters

Inkjet printing takes a digital data from a computer representing an image or a character and reproduces it onto a substrate using ink drops as a non-contact technique (Fig. 2). They're also known as drop-on-demand printers. The controlled volumes of the ink materials are delivered to predefined locations by such ink bioprinters. The first inkjet printers used for the bioprinting applications were modified versions of the ink-based 2D printers [7]. There are three major types of drop-on-demand bioprinters: thermal, piezoelectric, and mechanical. Their basic structure has a cartridge, which is filled with the material to be printed, called as bio-ink. Bioink material is then forced through a microfluidic reservoir to an output nozzle.

Thermal inkjet printers use electrical heating of the print head to produce pulses of pressure that force droplets from the nozzle. In literature, it has been observed that there is no significant bad effect on the biological molecules because of this localized heating, ranging from 200 °C to 300 °C. Mammalian cells are affected by the viability or post-printing function in a negative way at these temperatures [8]. The thermal inkjet printers offer benefits such as high print speed, low cost, and wide availability. Therefore, exposing the cells and materials

to a thermal and mechanical stress is the biggest disadvantage of this method. Moreover, low resolution, changes in the droplet size, and possible blockage of the nozzle tip are the other significant disadvantages for the use of these printers in bioprinting process [2].

In piezoelectric inkjet bioprinters, applying a voltage to a piezoelectric material induces a rapid change in shape and create acoustic waves to interrupt the liquid into droplets at regular intervals. Such acoustic waves generate the pressure inside bioink materials to eject droplets from the nozzle [9]. The piezoelectric printers lead to generate and control a uniform droplet size and ejection directionality as well as to prevent exposure of cells to heat and pressure stressors. That reduces the potential loss of cell viability and function and avoids the problem of nozzle blockage. Therefore, there are some concerns that the piezoelectric inkjet bioprinters with 15–25 kHz frequencies induce damage on the cell membrane and lysis [10]. In addition, such bioprinters also have limitations because of the material viscosity, which the excessive force required to eject drops using solutions at higher viscosities [11].

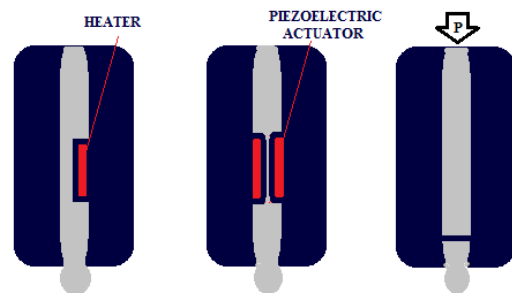


Figure 2. Schematic representation of inkjet printer methods.

The figure on the left shows thermal inkjet bioprinter. The figure in the middle shows piezoelectric bioprinter. The figure on the right shows mechanical inkjet bioprinter

Mechanical inkjet bioprinters use pressure through the nozzle to flow of bioink material. The pressure source can be pneumatic or a pump based system. This types of inkjet bioprinters have a valve on the nozzle tip. The valve opens to allow bioink to flow through the tip, drop by drop [28]. The main disadvantages of these bioprinters are the cell damage caused by the mechanical pressure and nozzle clogging problems. It's an old technique compared to the others.

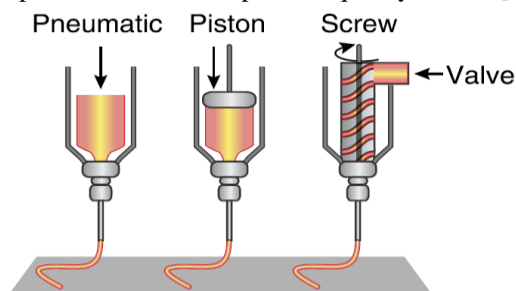
#### 3.1. Microextrusion Bioprinters

The extrusion based bioprinting technique has a fluid-dispensing system and an automatic robotic system in order to extrude the gel-form bioink and bioprint a model [12]. The bioink is located using a positioning system, with computer-aided design tools. The printed products are desired 3D custom-shaped structures that are formed with cylindrical filaments. These cylindrical filaments may contain cells and other biological materials. Such a better integrity on the structure can be provided by a rapid

manufacturing method due to the continuous deposition of filaments.

The fluid polymers can be dispensed using systems of the pneumatic, screw-driven, piston or solenoid-based system; however, the solenoid-based dispensers are not convenient to use for bioprinting [13].

The pneumatic system uses pressured air with/without a valve configuration. The valve-free system has been widely used because of its simplicity. Therefore, the preferable configuration is the valve-based system can be because it has higher resolution than the other system due to its pressure control and pulse frequency control [13].



**Figure 3.** Microextrusion bioprinting systems [2].

Mechanical microextrusion systems use a piston or a screw-driven configuration; working principle is shown in Fig. 3. The piston-driven dispenser maintains more direct control over the bioink flow through the nozzle [14]. On the other hand, the screw-driven dispenser may give more positional control and is more useful for processing the high viscous bioinks [14].

However, the screw-driven dispenser can damage the loaded cells, because its mechanism exposes bigger pressure drops along the nozzle. Thus, the rotating screw gear of the dispenser must be carefully designed as an extrusion-based bioprinter. Both piston and screw types of mechanical microextrusion can work synergistically. For example; the screw-driven dispenser melts polycaprolactone (PCL) before deposition while the piston-driven dispenser, having syringe pumping, extrudes hydrogel [15].

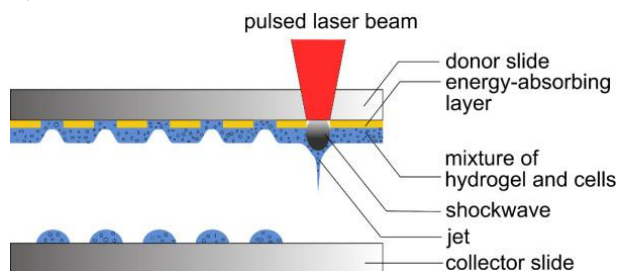
Extrusion based bioprinters are simple to construct and affordable. High viscous biomaterials can be used as bioink for producing a tissue-specific scaffold or small tissues. Also, large constructs can be created. Cell spheroids, cell aggregates can be used as bioink and them self-assembled into complex tissues by this printing method.

The drawback of these methods is that only high-viscous materials can be extruded. Low-viscous materials need high pressure for extrusion and this cause high shear stress, which tends to kill cells. Cell survival rates decrease with increasing pressure.

### 3.1. Laser-Assisted Bioprinting

Laser-assisted bioprinting (LAB) is based on the principles of laser-induced forward transfer. The laser-induced forward transfer is a printing process allowing

the deposition of a small amount of material in solid or liquid phase with high resolution [16]. A typical LAB device consists of a pulsed laser beam, a focusing system, a ribbon that has a donor transport support usually made from glass that is covered with a laser-energy-absorbing layer and a layer of biological material prepared in a liquid solution, and a receiving substrate facing the ribbon. LAB functions using focused laser pulses on the absorbing layer of the ribbon to generate a high-pressure bubble that moves cell-containing materials toward the collector substrate [17]. The LAB setup is shown in Fig. 4.



**Figure 4.** Schematic laser-assisted bioprinting setup [17].

The resolution of LAB is influenced by many factors, including the laser flow rate, the surface tension, the ability to get substrate being wet, the air gap between the ribbon and the substrate, and the thickness and viscosity of the biological layer [18]. LAB is a nozzle-free method; therefore the clogging problem with the bioprinting materials and cells is executed. It is compatible with a range of viscosities and can print mammalian cells with a low effect on cell viability and function [17].

Despite such advantages, the high resolution of LAB demands a rapid gelation rate to gain high shape suitability, which results in a relatively low overall flow rate. That disadvantage prevents the production of highly complex tissues by this technique. Another disadvantage of this method is the metallic absorbing layers which produce metallic residues on the product. Metallic contamination of tissues must be inhibited. Besides these drawbacks, LAB is a very expensive device [2]. To eliminate these disadvantages, there are many types of research are in progress. LAB may be an effective prospect for tissue engineering applications.

## 4. MATERIALS & BIOINK

Selection of proper biomaterials as the bioink is a vital step to gain a successful bioprinting product. Bioinks based on both naturally derived and synthetic biomaterials have been developed to provide a few key properties, such as biocompatibility and appropriate physical properties, to provide printability and long-term functionality following deposition [5].

The materials selection and their performance in order to use in bioprinting depend on printability, biocompatibility, structural, mechanical degradation, and biomimicry properties. Materials should be proper for

printing processes, gelation methods material viscosity are important. The materials also should be biocompatible for not creating an immune response in the host. Materials' degradation products should be non-toxic, and their degradation rate should be proper to tissue. Mechanical properties should be similar to the tissue that we constructed. The selected bioink materials should mimic the tissue-specific endogenous material compositions of the tissues [2].

Naturally-derived polymers, such as collagen, chitosan, and some of the synthetic polymers, such as polyethylene glycol (PEG), poly(lactic-co-glycolic) acid (PLGA), are widely used in regenerative medicine field and tissue engineering applications. Materials of bioinks must be biocompatible, with proper mechanical and structural properties. Moreover, bioinks should be compatible with 3D printing application. Because of these obligations generally, natural polymers are proper materials as a bioink material. Due to the application of bioprinting, bioinks may be composed of cells, cross-linked polymers, stem cells and cell signaling molecules.

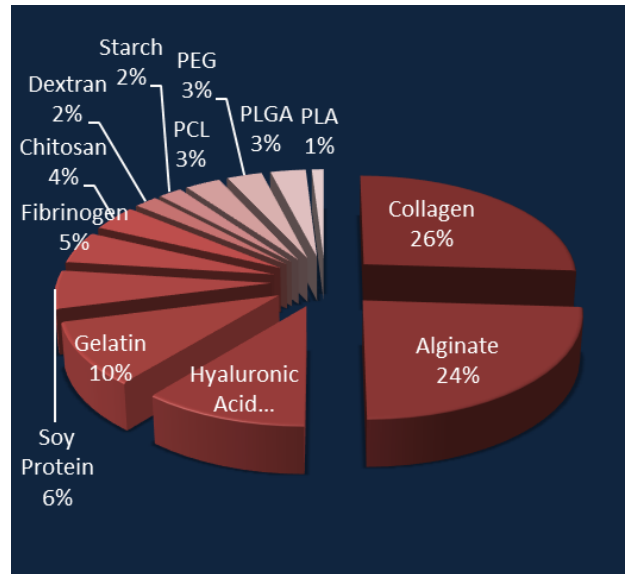
In literature, the methods for bioink printing can be observed in two pathways; printing bioink as functional scaffolds with various polymers, or scaffold-free printing methods which only use cells as bioink material to print. In both cases, viable bioprints which have loaded with the cells, need a sufficient nutrient transport through vasculature mimics or pores. If the material is not adequately presented excessive swelling, the crosslinked porous and vascular structure can be lost, which ends up with the prevention of nutrients from supplying the cells in the constructs. The printed materials have to also physically support the desired structure, so mechanical properties must be suitable for the designated tissue or location.

#### 4.1. Cells for Bioink

We can use any type of cells as a bioink material. The cells that we selected may be mature or pluripotent stem cells, due to the printing strategy and procedure, but they are not useful by themselves. Cells need a delivery medium for the printing process, and they need a growth media for a successful product at the end of printing. That indicates the importance of proper polymer material selection.

#### 4.2. Polymers for Bioink

Materials must be selected properly for bioink success. When polymers selected as a bioink material, it's required to understand how polymer characteristics influence printing efficacy and cytocompatibility. Because using of these bioinks during the printing process, they are expected to maintain structural integrity for the printed product. Polymer materials using for 3D bioprinting is shown in Fig. 5. Table 1 shows the polymers which have been used as bioink materials and their properties, in detail.



**Figure 5.** Chart diagramming natural and synthetic polymer distributions for use as bioinks compiled from relevant literature [19].

#### 4.3. Cell Aggregates

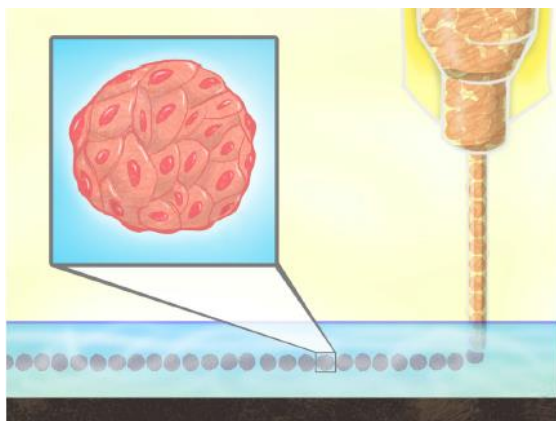
Scaffold-free bioprinting techniques are generally based on self-assembly approaches. With cell aggregate techniques, tissues can be engineered and modified with specific compositions and shapes. These tissues are printing with the advantage of cell-cell adhesion and they can grow and evolve in their own natural ECM. That reduces inflammatory responses and increases the biocompatibility of the engineered tissue [21].

For self-assembly applications, cell aggregates are the bioinks for bioprinting. These techniques are the closest endeavor to produce a whole complex organ. Some techniques have been developed and made a success of producing simply structured tissues such as skin, bone cartilage tissues without using a scaffold [22]. Self-assembly of cellular components perform the principles of embryonic development.

These techniques start with extremely high cell numbers. The aim of these techniques is triggering the cells to place to ECM in specific locations for inducing a proper growth of the tissue that we wanted. Schematic illustration of cell spheroid printing is shown in Fig. 5. The cell aggregates that we used for bioprinting can be found as cylinder, torus, spheroids, and honeycomb. Using cell spheroids for 3D bioprinting applications is a huge trend in the literature [14].

**Table 1.** Biocompatible polymers used as bioinks for stem cell, cell delivery, and scaffold materials are presented along with their crosslinking features and application in bioprinting stem cells [20].

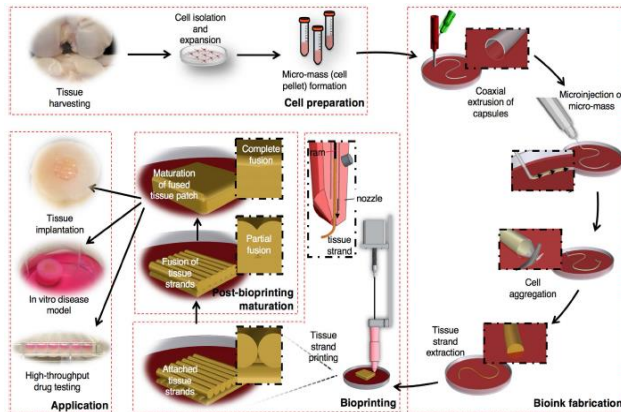
BIOINK	PROPERTIES	CROSSLINKING FEATURES	EXAMPLES
ALGINATE	Inexpensive, natural polysaccharide derived from algae. Bioinert, which may lead to anoxia and is often modified with RGD or additives such as hydroxyapatite. Crosslinking occurs rapidly hence <b>alginate is very popular as a bioink.</b>	Instant gelation in $Ca^{2+}$ solution.	Fabrication of osteochondral tissue equivalents.
AGAROSE	Bioinert. Forms cytocompatible and structurally stable hydrogels. Solidifies slowly, resulting in bioink spreading. Not biodegradable in mammals.	Thermal gelation, cells mixed at 40 °C and gels at 32 °C. No other polymerizers needed.	Printing of bone marrow stromal cells in agarose has been assessed.
HYALURONIC-MA	A non-sulfated glycosaminoglycan, usually used for producing soft tissue like hydrogels rather than ones conferring structural stability. Often mixed with gelatin, dextran or other polymers to overcome bioinertness and mechanical weakness.	UV triggered free radical polymerization.	Adipose stem cells printed in Gel Ma/HA Ma hydrogel, conferring high cell viability detected after 1 week (97%).
FIBRIN	Natural protein comprised of cross-linked fibrinogen, has quick crosslinking rate and is glue like in form. The mechanical stiffness is low, so often used in conjunction with other polymers.	Crosslinks through the thrombin cleavage of fibrin.	Blended with collagen to deliver stem cells by inkjet with the application of skin regeneration.
SILK FIBROIN	Good biocompatibility and mechanical properties. Mixed with gelatin to prevent nozzle clogging.	Crosslinked with tyrosinase or by sonification.	Silk fibroin-gelatin bioink used to print human nasal inferior turbinate tissue derived MSC that supports multi lineage differentiation.
GELATIN	Formed from partially hydrolysed collagen. More soluble than collagen. Melt/gelation temperature 30 °C–35 °C, requires secondary crosslinking for applications at physiological temperatures. Matrix can be remodelled by cells.	Crosslinked using glutaraldehyde, carbodiimide or transglutaminase. UV irradiation of the methacrylated form.	BMSCs printed in gelatin MA with BMP2 or osteogenic medium.
COLLAGEN-I	Rich in the integrin binding RGD motif. The ionic or pH changes involved in gelation are usually not gentle enough to allow cell bioprinting, however water soluble forms do exist. Collagen hydrogels are formed at low concentration. That confer for low elastic modulus. Unfortunately a 100% collagen hydrogel may not be ideal as a cellularized construct due to water exclusion and contraction induced by hydrophobic peptide residues.	Gels through hydrophobic bonding with a slow rate of crosslinking, so can be blended with faster crosslinking polymers such as alginate or fibrin.	MSCs in collagen hydrogel differentiate towards bioink for adipose derived SCs and human inferior turbinate tissue derived MSC.
dECM	Supplies a natural like ECM niche for the stem cells. The stem cells seeded in dECM scaffold show greater degree of differentiation than cells seeded in collagen.	Can form a bioink that remains as a solution below 15 °C and gels after 30 min at 37 °C.	Adipose, cartilage, and heart dECM used as cell printing bioink for adipose derived SCs and human inferior turbinate tissue derived MSC.
MATRIGEL	ECM like hydrogel rich in laminin, collagen and heparan sulfated proteoglycan. Has been used extensively for 3D cell culture.	Thermal gelation.	Not widely employed for bioprinting, used for printing HepG2 cells by temperature controlled syringe.
METHYL CELLULOSE	Can be used to aid printing of another polymer and is then released. Enhances print viscosity and porosity following release.	Thermal gelation.	Blended with alginate to print MSCs into a low concentration alginate hydrogel.
PEG	Bioinert, variable molecular weight allows tunable properties, altering stiffness can aid stem cell differentiation. Can easily joined to other molecules. Requires modification to allow crosslinking.	UV initiated photocrosslinking of the PEGDMA.	Bone marrow derived MSCs printed for osteogenic and chronogenic differentiation.

**Figure 6.** Spheroids are printed into “biopaper” which is a layer of hydrogel [23].

Tissue spheroid technique has some disadvantages due to its bioink properties. Tissue spheroids require a degradable carrying medium like thermo-sensitive hydrogel medium for extrusion through the nozzle tip. Such hydrogels are bioinert to cell adhesion. Moreover, tissue spheroids can fuse together very quick; so, they may start to accumulate in the nozzle and that affects their printability in a challenging way. In addition, for a complete fusion, tissue spheroids should be in contact tightly with each other, therefore, during the printing process, they may not be in contact tightly. That gives a leaky tissue as a product [14].

Instead of delivering cells in spheroid form with high density, delivering them in pellet form works more effectively [24]. In this technique, cells are printed into

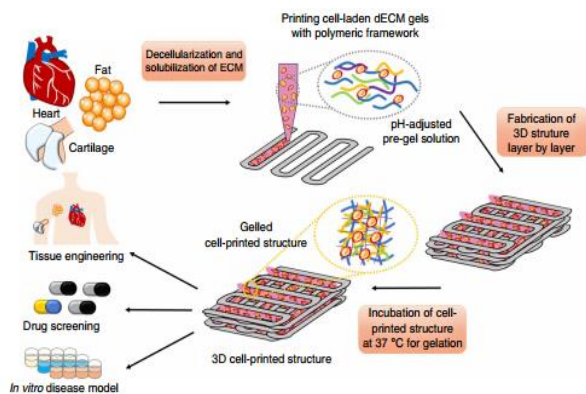
micro molds to form and aggregate in a strand shape. Molds are constructed with hydrogels, such as agarose or alginate, which are inert to cell adhesion [25]. The biggest obstruction with this approach is the necessity of a temporary molding material for making large-scale tissues. So, tissue strands can be considered as an alternative approach to overcome this challenge. Tissue strand printing uses long strands of tissues as bioink material. With tissue strand technique, the hard procedure of the spheroid preparation and loading, printing difficulties can be eliminated. The strands can be printed in coordination with the vasculature. That is the biggest advantage because that gives a convenience as a fabrication method to print out vascularized tissues. Tissue strand printing shows a great potential for fabricating large-scale tissues and organs in the future [26]. The concept of tissue printing is shown in Fig. 7. The advantages of the bioinks having cell aggregate compounds shows are well cellular interactions, close biomimicry, quickly tissue forming and long-term stability of cells in the 3D architecture. Although, they have a few limitations. Preparation of an essential amount of aggregates needs a quite high number of cells can go up to a few hundred million cells. In general, enlarging cells with such numbers are expensive, requiring intense effort, and some cell types cannot proliferate fast; therefore, their applicability and availability are limited [14].



**Figure 7.** The concept of tissue printing using tissue strands as bioink [26].

#### 4.4. Decellularized Extracellular Matrix

With the developments in hydrogel-free approaches, obtaining extracellular matrix from natural sources has been considered as a new bioink source for tissue and organ fabrication. After discovering the decellularization techniques of tissues, researchers aimed to use decellularized extracellular matrix (dECM) components in printing tissue analogues. In a recent study, they decellularized tissues and degraded them into smaller pieces, then loaded the mini-decellularized tissues with cells and printed with a polycaprolactone frame to support the mini tissues (Fig. 8). The natural differentiation of the cells observed with three different cell types loaded in their native dECM [27].



**Figure 8.** Schematic procedure for dECM bioink bioprinting [27].

With today's technology, decellularization of matrix components have some limitations which are related to their low affordability and abundance of the bioink, with the protocols which have been used. It's possible to have very small pieces of dECMs via the decellularization of tissues, therefore; a large volume of tissues is needed in order to produce tissues via bioprinting. Furthermore, the decellularization of ECM can cause losing mechanical and structural integrity. And, some toxic residuals can stay in the separated dECM components. Because of these problems, the printed bioink cannot allow forming cells while cells can absorb the matrix components or the

matrix shrinks significantly. Using a hard material is more beneficial to support the dECM structure due to the weakness of the mechanical properties. Thus, printing a frame with dECM supports, the dECM structure prevents collapsing of the printed product [14].

#### 5. CONCLUSIONS & FUTURE PERSPECTIVES

Bioprinting applications for tissue engineering is a very attractive subject for producing novel solutions to the many problems of the medical world. Present fabrication procedures are not sufficient to produce complex whole organs, but simple-structured organs and tissues can be produced with current approaches. In this study, the working principle of bioprinters and some significant approaches have been discussed. It has been observed that there is a great potential with current approaches, which can be classified as biomimicry, self-assembly and tissue building blocks. It seems like that, the key to success is the usage of these approaches co-operatively. The improvement of bioprinting applications also depending on the stem cell technology, materials science technology and high-scale production capabilities of the ingredients of bioink. In addition, post-printing treatments to the printed tissues may be considered as a solution to fabricate complex organs, with the principles of self-assembly, self-organization and embryonic development. When these problems solved, bioprinting will be one of the most important inventions of the world.

#### REFERENCES

- [1] Ozbolat, I. T. & Yu, Y. "Bioprinting toward organ fabrication: challenges and future trends." *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 60:691–699 (2013).
- [2] Murphy, S. V. & Atala, A. "3D bioprinting of tissues and organs." *Nat. Biotechnol.* 32: 773–785 (2014).
- [3] Derby, B. "Printing and Prototyping of Tissues and Scaffolds." *Science* 338: 921–926 (2012).
- [4] McRobbie, D. W. "MRI from picture to proton." *Cambridge University Press*, (2006).
- [5] Zhang, Y. S. et al. "3D Bioprinting for Tissue and Organ Fabrication." *Ann. Biomed. Eng.* (2016).
- [6] Kang, H.-W. et al. "A 3D bioprinting system to produce human-scale tissue constructs with structural integrity." *Nat. Biotechnol.* 34: 312–319 (2016).
- [7] Xu, T., Kincaid, H., Atala, A. & Yoo, J. J. "High-Throughput Production of Single-Cell Microparticles Using an Inkjet Printing Technology." *J. Manuf. Sci. Eng.* 130: 21017 (2008).
- [8] Cui, X., Dean, D., Ruggeri, Z. M. & Boland, T. "Cell damage evaluation of thermal inkjet printed Chinese hamster ovary cells." *Biotechnol. Bioeng.* 106: 963–969 (2010).
- [9] Tekin, E., Smith, P. J. & Schubert, U. S. "Inkjet printing as a deposition and patterning tool for

- polymers and inorganic particles.” *Soft Matter* 4, 703: (2008).
- [10] Cui, X., Boland, T., D D’Lima, D. & K Lotz, M. “Thermal inkjet printing in tissue engineering and regenerative medicine.” *Recent Pat. Drug Deliv. Formul.* 6: 149–155, (2012).
- [11] Kim, J. D., Choi, J. S., Kim, B. S., Chan Choi, Y. & Cho, Y. W. “Piezoelectric inkjet printing of polymers: Stem cell patterning on polymer substrates.” *Polymer* 51: 2147–2154, (2010).
- [12] Mironov, V., Boland, T., Trusk, T., Forgacs, G. & Markwald, R. R. “Organ printing: computer-aided jet-based 3D tissue engineering.” *Trends Biotechnol.* 21: 157–161, (2003).
- [13] Khalil, S., Nam, J. & Sun, W. “Multi-nozzle deposition for construction of 3D biopolymer tissue scaffolds.” *Rapid Prototyp. J.* 11: 9–17, (2005).
- [14] Ozbolat, I. T. & Hospodiuk, M. “Current advances and future perspectives in extrusion-based bioprinting.” *Biomaterials*, 76:321–343 (2016).
- [15] Visser, J. et al. “Biofabrication of multi-material anatomically shaped tissue constructs.” *Biofabrication* 5: 35007, (2013).
- [16] Delaporte, P. & Alloncle, A.-P. “Laser-induced forward transfer: A high resolution additive manufacturing technology.” *Opt. Laser Technol.* 78: 33–41 (2016).
- [17] Gruene, M. et al. “Laser Printing of Stem Cells for Biofabrication of Scaffold-Free Autologous Grafts.” *Tissue Eng. Part C Methods* 17: 79–87 (2011).
- [18] Guillemot, F., Souquet, A., Catros, S. & Guillotin, B. “Laser-assisted cell printing: principle, physical parameters versus cell fate and perspectives in tissue engineering.” *Nanomed.*, 5: 507–515 (2010).
- [19] Carrow, J. K., Kerativitayanan, P., Jaiswal, M. K., Lokhande, G. & Gaharwar, A. K. in “Essentials of 3D Biofabrication and Translation” 229–248, (2015).
- [20] Irvine, S. & Venkatraman, S. “Bioprinting and Differentiation of Stem Cells.” *Molecules* 21: 1188 (2016).
- [21] Jakab, K. et al. “Tissue engineering by self-assembly and bio-printing of living cells.” *Biofabrication* 2: 22001 (2010).
- [22] Norotte, C., Marga, F. S., Niklason, L. E. & Forgacs, G. “Scaffold-free vascular tissue engineering using bioprinting.” *Biomaterials* 30: 5910–5917 (2009).
- [23] Patra, S. & Young, V. “A Review of 3D Printing Techniques and the Future in Biofabrication of Bioprinted Tissue.” *Cell Biochem. Biophys.* 74: 93–98 (2016).
- [24] Ozbolat, I. T. “Scaffold-based or scaffold-free bioprinting: competing or complementing approaches” *J. Nanotechnol. Eng. Med.* 6: 24701 (2015).
- [25] Tan, Y. et al. “3D printing facilitated scaffold-free tissue unit fabrication.” *Biofabrication* 6, 24111 (2014).
- [26] Yu, Y. et al. “Three-dimensional bioprinting using self-assembling scalable scaffold-free ‘tissue strands’ as a new bioink.” *Sci. Rep.* 6: 28714 (2016).
- [27] Pati, F. et al. “Printing three-dimensional tissue analogues with decellularized extracellular matrix bioink.” *Nat. Commun.* 5: (2014).
- [28] Binder, K. W., Allen, A. J., Yoo, J. J. & Atala, A. “Drop-On-Demand Inkjet Bioprinting: A Primer.” *Gene Ther. Regul.* 6: 33–49 (2011).





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

# Vakum tüplü U-borulu güneş kolektörünün güneş simülatöründeki test sonuçlarının analizi

## *Analysis of the test results on the solar simulator of the U-pipe evacuated tube solar collector*

Yazar(lar) (Author(s)): Ahmet ÖZSOY<sup>1</sup>, Mustafa GALİP<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-0911-9799

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-4934-5651

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Özsoy A., Galip M., “Vakum tüplü u-borulu güneş kolektörünün güneş simülatöründeki test sonuçlarının analizi”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 229-236, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.385469

# Vakum Tüplü U-Borulu Güneş Kollektörünün Güneş Simülatöründeki Test Sonuçlarının Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Ahmet ÖZSOY<sup>1\*</sup>, Mustafa GALİP<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 23.06.2017 ; Kabul/Accepted : 03.01.2018)

## ÖZ

Bu çalışmada iç ortam şartlarında güneş simülatöründe vakum tüplü U-borulu bir güneş kollektörü test edilerek verim eğrisi oluşturuldu. Farklı akışkan debilerinde güneş kollektörünün basınç düşümü belirlendi. Simülatörden güneş kollektörü üzerine gelen ışınlar halojen lambalarla sağlanmakta olup, ışınlar kollektör üzerine güneş ışınları gibi birbirine paralel olarak gelmediğinden verim hesabında, absorber izdüşüm alanının kullanılmasının yanıltıcı olacağı görüldü. Daha gerçekçi bir yaklaşım olarak, ışınların geldiği açısız absorber alanının hesaplanması ile ilgili bir yöntem geliştirildi. Kollektör absorber izdüşüm alanına bağlı kollektör verimi %116 ile %80 arasında değişirken, açısız absorber alanına bağlı kollektör veriminin %56 ile %38 arasında değiştiği görüldü. Deneysel çalışmadan elde edilen bu sonuçlar, güneş simülatöründe vakum tüplü güneş kollektörü testlerinde verim hesabında kullanılacak alanın belirlenmesinin önemini ortaya çıkardı. Ayrıca kollektördeki akışkan debisinin kollektör verimine ve basınç düşümüne etkisi de incelendi. Kollektördeki akışkan debisi arttıkça basınç düşümünün de arttığı, göreceli olarak akışkan debisi ile verimde de bir artış gözlemlendi.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş enerjisi, vakum tüplü güneş kollektörü, u-borulu güneş kollektörü, güneş simülatörü.

## Analysis of the Test Results on the Solar Simulator of the U-Pipe Evacuated Tube Solar Collector

### ABSTRACT

In this study, a U-pipe evacuated tube solar collector was tested in a solar simulator under indoor conditions and an efficiency curve was formed. The pressure drop of the solar collector was determined for different mass flow rates. Beams that come from the simulator to the solar collector are provided with halogen lamps. Since beams from the lamps do not come parallel to the collector like solar beams, it would be misleading to use the absorber projection area in the calculation of efficiency. As a more realistic approach, a method that calculates the angular absorber area of beams was developed. While collector efficiency that depends on the collector absorber projection area varies between 116% and 80%, collector efficiency that depends on the field of the angular absorber has changed between 56% and 38%. These results obtained from the experimental study reveal the importance of determining the collector's area to be used in the solar simulator for the efficiency calculation of evacuated tube solar collector tests. The effect of fluid flow on collector efficiency and pressure drop is also investigated. As the fluid flow in the collector increases, the pressure drop also increases and a relatively increase in the efficiency is observed.

**Keywords:** Solar Energy, evacuated tube solar collector, u-pipe solar collector, solar simulator

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde küresel ısınma ve konvansiyonel enerji kaynaklarının azalması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelim artmakta olup, bu kaynakların başında da güneş enerjisi gelmektedir. Güneş enerjisi kullanılarak sıcak su veya elektrik enerjisi üretilmesi mümkündür. Sıcak su üretimi yaygın olarak düzlemsel kollektörleri veya vakum tüplü kollektörlerle yapılmaktadır.

Dış ortam ile kollektör sıcaklığı arasındaki farkın az olduğu durumlarda düzlemsel kollektörlerinin verimleri yüksektir. Sıcaklık farkı arttıkça ısı kayıpları da artar ve kollektör verimi düşer. Vakum tüplü kollektörlerin kullanılmasıyla, ısı kayıpları azaltılarak kollektörlerin

daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesi sağlanır. Vakum tüpler iki borosilikat cam tüpün iç içe geçirilerek arasındaki havanın  $5 \times 10^{-3}$  Pa değerine kadar vakumlanmasıyla üretilir. Bu vakum katmanını kollektör seçici yüzeyinden çevreye olan ısı kayıpları azaltmakta ve düzlemsel kollektörlerin kullanılmadığı yüksek sıcaklıklarda vakum tüplü kollektörlerin verimli şekilde kullanılabilmesini sağlamaktadır.

Ülkemizde düşük sıcaklıklar için, düzlemsel güneş kollektörlerinin üretimi ve kullanımı yaygın olmakla birlikte vakum tüplü kollektörlerinin üretimi kısıtlı ve kullanımı da kısmen yaygındır. Kullanılan vakum tüplü sistemler çoğunlukla akışkanın doğrudan cam tüp içinde bulunduğu sistemler ile ısı borulu vakum tüplü sistemlerdir. Vakum boru içerisinde U şeklinde borular kullanılarak oluşturulan U-borulu vakum tüplü sistemler ise hemen hemen hiç kullanılmamaktadır.

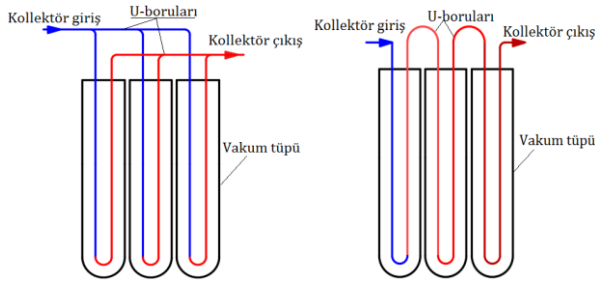
\*Sorumlu yazar (Corresponding Author)  
e-posta : ahmetozsoy@sdu.edu.tr

Yaghoubi vd., vakum tüplü güneş kolektörlerinde vakumun ısı kayıplarına etkisi 250 kW gücündeki bir santralde kullanılan vakum tüplü parabolik kolektörlerde incelemiştir [1]. Yapılan çalışmada normal vakum tüp, az vakumlu tüp ve vakum tüpü kırılarak sadece emici yüzeyin kullanıldığı üç farklı sistem üzerinde ölçümler yapılmış, yüzey sıcaklıkları bu üç farklı uygulama için sırasıyla 47 °C, 57 °C ve 181 °C olarak görülmüştür. Yapılan sayısal çalışmada kolektör verimleri bu üç sistem için sırasıyla %61, %58 ve %46 olarak hesaplanmıştır. Vakum azaldıkça ısı kayıplarının artarak, akışkan çıkış sıcaklıklarının düştüğünü bildirilmiştir.

Güneş kolektörlerinde akışkan sıcaklığı ile dış ortam sıcaklığı arasındaki fark arttıkça ısı kayıplar arttığı için verim azalır. Belirli bir sıcaklık farkından sonra verim sıfıra gider. Verimin sıfıra düştüğü bu noktaya stagnasyon noktası denir. Vakum tüplü kolektörlerde stagnasyon noktası düzlemsel güneş kolektörlerine göre çok daha yüksek sıcaklıklardadır. Vakum tüplü sistemler; suyun doğrudan cam tüp içinde akan sistemler, vakum tüplü ısı borulu sistemler ve U-borulu vakum tüplü sistemler şeklinde sınıflandırılabilir. U-borulu vakum tüplü kolektör sistem ile sulu vakum borulu kolektörün karşılaştırıldığı bir çalışmada kolektör verimi her iki sistem için sırasıyla %51,8 ve %35,2 olarak ve birim alandan alınan enerji de sırasıyla 192 kWh/m<sup>2</sup> ve 132 kWh/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur [2].

Doğal sirkülasyonlu U-borulu bir sistem ile ısı borulu sistem, ışınım şiddetinin çok değişken olduğu Malezya şartlarında dış ortamda test edilmiş, çalışmada ısı borulu sistem verimi %65, U-borulu sistem verimi ise %53 olarak bulunmuştur [3].

Vakum tüplü U-borulu kolektörlerde U-borularının bağlantıları paralel veya seri olarak (Şekil 1) bağlanabilir. Paralel bağlantılı sistemlerde, sistemde dolaşan toplam akışkan miktarı fazladır. Seri bağlantılı sistemlerde ise kolektörden çıkan akışkan sıcaklığı daha yüksektir. Bazı durumlarda hem seri hem de paralel bağlantı uygulamaları kombine olarak yapılabilmektedir [4].



Şekil 1. Paralel ve seri bağlı U-borulu sistemler (Paralel and serial connected U-pipe systems)

Vakum tüplü ısı borulu veya U-borulu sistemlere verimi artırmak amacıyla mini yansıtıcılar da yerleştirilebilmektedir. Aboulmagd vd. vakum tüplü U-borulu parabolik kolektörde yansıtıcılı ve yansıtıcısız

kullanımının ısı analizi çalışılmıştır [5]. Ma vd., tarafından yapılan çalışmada [6], ortalama akışkan sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasında 100 °C'lik fark olması durumunda yaklaşık %38 verim elde edilerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Gao vd. [7], TRNSYS ile simüle edilen vakum tüplü U-borulu kolektörlerin teorik ve deneysel sonuçlarını karşılaştırmış ve kolektör akışkan çıkış sıcaklığının teorik modele çok yakın olduğu belirtilmiştir. Kolektör için optimum debinin farklı iklim bölgeleri ve ışınım şiddetleri ile değişebileceği belirtilmiştir.

Ong vd. [8] doğal dolaşımli vakum tüplü U-borulu kolektörü farklı coğrafi yönlere yönlendirerek test etmiş, uzun dönemli çalışma sonucunda en iyi performans değerlerinin güney ve doğu yönlerinde alındığı belirtilmiştir.

Liang vd. [9, 10] cam tüp içerisine iki veya daha fazla U-borusu konulmasının kolektör verimine etkisi incelenmiş, 1, 2 ve 3 U-borulu kolektör verimleri sırasıyla 0,74, 0,77 ve 0,82 olarak bulunmuştur. Başka bir çalışmada ise vakum tüplü U-borulu kolektörde cam tüp içerisi 106,36 W/m<sup>2</sup>K ısı iletkenliğe sahip grafit esaslı malzeme ile doldurulmasının kolektör verimine etkisini incelenmiştir. Eklenen maddeyle, bakır levha kanat kullanılan kolektöre kıyasla %11,42 verim artışı sağlandığını belirtilmiştir [11].

Güneş kolektörlerinin dış ortamda gerçek şartlarda test edilmesinde, dış ortam sıcaklığı, ışınım şiddeti ve rüzgâr etkisi gibi kolektör verimini doğrudan etkileyen girdiler sabit olmayıp, zamanla değişmesi nedeniyle sağlıklı veri alınmasında sorunlar yaşanabilmektedir. Bu nedenle güneş kolektörlerinin dış ortam şartlarından etkilenmeden sabit şartlarda test edilmesi, laboratuvar ortamında güneş simülatörlerinde yapılabilmektedir.

Güneş simülatörü ile ilgili çalışmalar incelendiğinde Shatat vd., 30 adet 400 W halojen lamba kullanarak 2,32 m<sup>2</sup>'lik bir simülatör oluşturmuş, lambalara uygulanan elektriksel gerilimi değiştirerek simülatör alanında lambalardan 15, 25, 35 ve 45 cm uzaklıklarda 200 ile 900 W arasında ışınım şiddeti elde edilmiştir [12, 13].

Özsoy vd. 28 adet halojen projektör ile oluşturdukları 100x200 cm büyüklüğündeki simülatörde 946 W/m<sup>2</sup> ortalama ışınım sağlanmış, düzlemsel güneş kolektörlerinde çift cam uygulaması deneysel olarak incelenmiştir [14].

Güneş kolektörlerinde ısı performans testleri sabit sıcaklık değerindeki ölçümlerle veya dış ortamda gerçek çalışma koşullarında zamana bağlı değişiminin incelendiği çalışmalar da vardır. Sabit sıcaklık testlerinde akışkanın kolektöre giriş sıcaklık değerleri belirlenir ve bu sabit değerlerde ölçümler alınarak kolektör verim grafiği oluşturulur. Zamana bağlı değişim deneylerinde ise kolektörün tüm gün boyunca, gerçek çalışma koşullarındaki veriminin anlık olarak değişimi gözlemlenir. Sabit sıcaklık metodu yaygın olarak kullanılmasına karşın bazı araştırmacılar [15-20] zamana bağlı değişimi incelemiş, bazılarıysa [4, 6, 7, 11] sabit

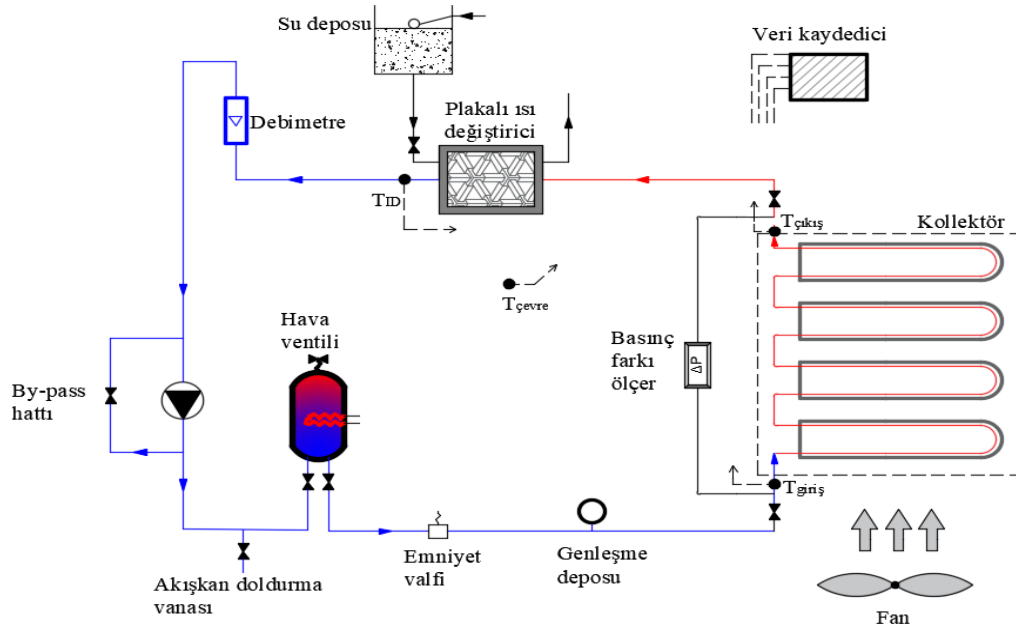
sıcaklık deneyleriyle kollektör verim grafiğini oluşturmuşlardır.

TS EN ISO 9806 standardı [22] güneş kollektörlerinin iç ortamda test edilmesi ile ilgili bir standarttır. Bu standarda göre iç ortam performans testlerinde ışınım değeri en az  $700 \text{ W/m}^2$ , kollektörde birim alan için akışkan debisi  $0,02 \text{ kg/s m}^2$  ve rüzgâr hızı  $1-4 \text{ m/s}$  olmalıdır. Test boyunca kollektördeki akışkan debisindeki değişim  $\pm\%10$ 'dan fazla olmamalıdır.

Düzlemsel güneş kollektörleri yüzey alanı düz olduğu için ışınım alınan yüzey bellidir. Ancak vakum tüplü kollektörler silindirik yapıları nedeniyle simülatörde ışınım üreten lambalarla olan konumlarına göre her bir vakum tüp farklı ışınım alanına sahiptir. Dış ortam şartlarında test edilen yada kullanılan güneş kollektörü üzerine gelen güneş ışınimleri, tek kaynaktan ve birbirine paralel olarak geldiğinden alan belirlidir. Vakum tüplü güneş kollektörlerinin iç ortam şartlarında bir güneş simülatöründe test edilip, sonuçların dış ortam şartlarında çalışacak sistemlere uygulanmasında hangi alanın

Bu amaçla hazırlanan test düzeneği şematik olarak Şekil 2'de görülmektedir.

Test düzeneğinde kollektöre gönderilen akışkan sıcaklığını istenilen değerde ayarlamak için  $60 \text{ lt}$  kapasiteli bir elektrikli termosifon kullanıldı. Termosifondan alınan su bir pompa yardımıyla sisteme gönderildi. Kollektöre giren ve çıkan akışkan sıcaklığı Pt100 tipi sıcaklık ölçme elemanları ile ölçüldü. Sistemde dolaşan akışkan debisi Krohne rotametre ile ve kollektördeki basınç düşümü, kollektör giriş ve çıkışındaki fark basınç transmitteri (Autrol APT3100) yardımıyla ölçüldü. Kollektörden çıkan akışkan sıcaklığını kollektör giriş sıcaklığına yakın bir değere getirmek amacıyla plakalı ısı değiştirici kullanılarak depo sıcaklığının sabit bir değerde kalması sağlandı. Test edilen kollektörün alt ve üst tarafına yerleştirilen birer adet K tipi termokupilla ortam sıcaklığı ölçüldü. Ölçülen bu sıcaklıkların ortalaması dış ortam sıcaklığı olarak alındı. Sıcaklık ölçümleri Ahlborn Almemo 5690-2 ile kaydedildi. Test edilen güneş kollektörü üzerindeki ısı



Şekil 2. Deney düzeneğinin görünümü (The view of the experimental setup)

kullanılacağı konusunda belirsizlik yaşanabilecektir.

Bu çalışmada tarafımızdan tasarlanıp üretilen güneş simülatörü ile laboratuvar ortamında vakum tüplü U-borulu güneş kollektörü ısıl performans testi TS EN ISO 9806 standardına göre yapılmış, güneş simülatörü kullanılarak yapılan vakum tüplü kollektör deneylerinde farklı alanların kollektör verimine etkisi incelenmiştir.

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

### 2.1. Deney Düzeneği (Experimental Setup)

Güneş kollektörlerinde kararlı halde ısıl performans testleri sabit ışınım şiddeti ve akışkan debisinde, kollektöre giren akışkan sıcaklığı değiştirilerek yapılır.

toplanmasını önlemek amacıyla kollektör ile halojen lambalar arasına cam konuldu. Bir adet fan cam örtü üzerindeki ısınmayı önlemek amacıyla, bir adet fanla kollektör üzerinde rüzgâr etkisi oluşturuldu ve ortalama hız Testo 445 ile  $1,5 \text{ m/s}$  olarak ölçüldü. Simülatördeki ortalama ışınım şiddeti üç farklı ölçüm yapılarak ortalama  $1040 \text{ W/m}^2$  olarak bulundu. Güneş simülatöründe test aşamasındaki U-borulu vakum tüplü güneş kollektörü Şekil 3'te görülmektedir.

Bu çalışmada Sunmax SX-SS 17 [25]. U-borulu güneş kollektörü test edilmiştir. Çizelge 1'de çalışmada kullanılan vakum tüplü U-borulu güneş kollektörünün teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 3. Güneş simülöründe U-borulu vakum tüplü güneş kolektörü testi (U-pipe evacuated tube solar collector test in the solar simulator)

Çizelge 1. Vakum tüplü U-borulu güneş kolektörünün teknik özellikleri (Technical specifications of U-pipe evacuated tube solar collector)

Cam tüp	Dış cam çapı (m)	0,047
	İç cam çapı (m)	0,038
	Cam tüp uzunluğu (m)	1,850
	Cam tüp emici yüzey uzunluğu (m)	1,800
	Cam tüp sayısı (adet)	17
U-borusu	Boru dış çapı (m)	0,010
	Et kalınlığı (m)	0,005

## 2.2. Güneş Kolektörü Yüzey Alanı ve Verim Analizi (Solar Collector Surface Area and Efficiency Analysis)

Güneş kolektörlerinde verim, alınan enerjinin, kolektör yüzeyine gelen enerjiye oranı şeklinde ifade edilir. Alınan ısı enerjisi, gelen enerji ile kaybolan enerjinin farkı şeklinde tanımlanır. Güneş kolektörü verimi Eşitlik 1'de verilmiş olup Eşitlik 2'deki gibi de yazılabilir.

$$\eta_k = \frac{Q_a}{Q_g} \quad (1)$$

$$\eta_k = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{A I} \quad (2)$$

Burada  $\dot{m}$  (kg/s) kütleli debi,  $C_p$  (J/kg°C) akışkanın özgül ısı,  $\Delta T$  (°C) akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıkları farkı,  $A$  (m<sup>2</sup>) kolektör alanı ve  $I$  (W/m<sup>2</sup>) ışınım şiddetidir. Güneş kolektörlerinin verimi dış ortam sıcaklığı, ışınım şiddeti ve kolektörün ortalama akışkan sıcaklığı ile değişir. Bu değişim azaltılmış sıcaklık olarak tanımlanmış olup  $T^*$  ile ifade edilir.  $T^*$  Eşitlik 3'te verilmiştir.

$$T^* = \frac{T_k - T_c}{I} \quad (3)$$

Burada  $T_k$  (°C) kolektördeki ortalama akışkan sıcaklığı ve  $T_c$  (°C) çevre sıcaklığıdır. Kolektördeki ortalama akışkan sıcaklığı, akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıklarının,

çevre sıcaklığı ise kolektörün üst ve alt sıcaklıklarının aritmetik ortalaması olarak alınır.

Düzlemsel güneş kolektörlerinde verim hesabında ışınımın geldiği alan belirlidir. Ancak vakum tüplü kolektörler iç içe geçmiş iki cam tüp kullanıldığından, alan tanımı farklı şekillerde yapılabilmektedir. Bunlar brüt alan, açıklık alanı ve absorber yüzey alanıdır. Brüt alan; kolektörün dıştan dışa ölçüleriyle kapladığı izdüşüm alanıdır. Açıklık alanı (aperture area) cam tüplerin ara boşlukları ile birlikte izdüşüm alanıdır. Absorber alan ise, emici yüzey olarak kullanılan içteki cam tüpün izdüşüm alanıdır.

Vakum tüplü güneş kolektörlerinin dış ortamda güneş ışınımı altında yapılan testlerde ışınım kaynağı olan güneşten direkt ışınlar paralel olarak gelmekte olup, kolektör absorber alanı üzerinde ısı enerjisine dönüşür. Ancak simülör altında gerçekleşen deneylerde kolektöre çok yakın mesafede ve çok sayıda ışınım kaynağı bulunmaktadır. Işınım kaynağı olarak kullanılan lambalardan çıkan ışınlar ortama farklı açılarla dağılmaktadır. Bu nedenle absorber alanı olarak dış ortam şartlarında test edilen vakum tüp kolektörler için kullanılan içteki cam tüpün izdüşüm alanının kullanımı verim hesabında hatalı sonuçlar verir. Fraunhofer Enerji Enstitüsü'nün yayınladığı vakum tüplü bir kolektörün test raporunda absorber izdüşüm alanı kullanılarak kolektör verimi %110 olarak, cam tüp tam silindirik alanı kullanılarak elde edilen verim ise %60 olarak verilmiştir [21]. Yapılan bazı çalışmalarda silindirik alan, bazılarında ise izdüşüm alanı kullanılmıştır [6-11]. Absorber alanı ile ilgili olarak standartlarda da bir açıklama bulunmamaktadır [22-24].

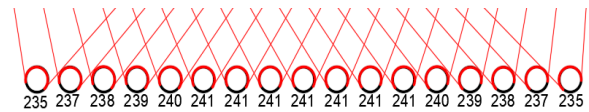
Işınım alınan yüzey olarak içteki cam tüpün (absorber tüp) izdüşüm alanı yada yarı silindirik çevresel alan alınabilir. Bu iki durum için alanlar Eşitlik 4 ve 5'te verilmiştir.

$$A_{abs,izd} = n D_{abs} L_{abs} \quad (4)$$

$$A_{abs,ysil} = n \pi D_{abs} L_{abs} / 2 \quad (5)$$

Burada  $n$  (ad) kolektördeki cam tüp sayısını,  $D_{abs}$  (m) iç cam tüp dış çapı ve  $L_{abs}$  (m) ise absorber alanı kaplı cam tüp uzunluğunu ifade etmektedir.

Bu çalışmada absorber alanı hesabına yönelik farklı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda güneş simülördeki lamba konumları ve kolektör gerçek ölçüleriyle AutoCAD programı ile çizilerek, her bir vakum tüpü için aktif ışınım demetleri boru yüzeyine gönderilmiş, ışınım alan yüzeyler açılacak olarak belirlenmiştir. Belirlenen açılacak değerler Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Güneş simülöründe vakum tüplerin ışınım alan açılacak yüzey alanları (Angular surface areas that actively receive radiation of evacuated tube in the solar simulator)

Burada her cam tüpün altında yazan değer, cam tüpün iki tarafından gelen ışınların alındığı alanın belirlenmesinde kullanılacak açıdır. Bu açısal değerlerden ( $\alpha$ ) ışınım alan yüzey alanı bulunur. Şekilden görüldüğü gibi ışınım alma açısı arttıkça her vakum tüpün ışınım alan yüzey alanı da artacaktır. Bu çalışmada kullanılan 17 vakum tüpten oluşan güneş kollektörünün ortadaki 7 vakum tüpe  $241^\circ$  açıyla ışınım gelmekte, yanlara doğru gidildikçe ışınım alma açısı azalmakta ve kollektörün her iki tarafındaki birer vakum tüp  $235^\circ$  açıyla ışınım almaktadır (Şekil 4). Kollektör açısal absorber alanı Eşitlik 6 ile hesaplanır.

$$A_{abs.a} = \pi D_{abs} L_{c.tüp} \alpha / 360 \quad (6)$$

Burada  $A_{abs.a}$  ( $m^2$ ) açısal alanı,  $D_{abs}$  ( $m^2$ ) seçici yüzeye kaplı vakum tüp dış çapını ve  $L_c$  (m) vakum tüp ışınım alan uzunluğunu ifade etmektedir. Absorber alanın belirlenmesinde iç cam tüp iz düşüm alanı, silindirik alanı veya açısal yüzey alanı kullanılması hesaplanan değer yüksek veya düşük görünmesine neden olur. Fakat kazanılan ısı her durumda sabittir. Çizelge 2’de kullanılan kollektöre ait hesaplanan alan değerleri verilmiştir.

**Çizelge 2.** Hesaplanan kollektör alan değerleri (Calculated values of the collector area)

Alan adı		
Kollektör brüt alanı ( $m^2$ )		2,400
Kollektör açıklık alanı ( $m^2$ )		1,438
Kollektör absorber alanı	İç cam izdüşüm alanı ( $m^2$ )	1,120
	İç cam yarı silindirik alanı ( $m^2$ )	1,830
	Açısal alan ( $m^2$ )	2,338

### 2.3. Belirsizlik Analizi (Uncertainty Analysis)

Bu çalışmada deneysel ölçümlerde kullanılan cihazlar ve ölçüm hassasiyetleri Çizelge 3’te verilmiştir. Çizelge 3’teki veriler kullanılarak kollektör verimi için hata analizi Eşitlik 7 ile yapılmıştır.

$$W_\eta = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial \dot{m}} w_{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial T} w_T\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial I} w_I\right)^2} \quad (7)$$

Burada  $\dot{m}$  kütleli debi ölçümlerini, T sıcaklık ölçümlerini ve I ışınım şiddeti ölçümlerini ifade etmektedir.

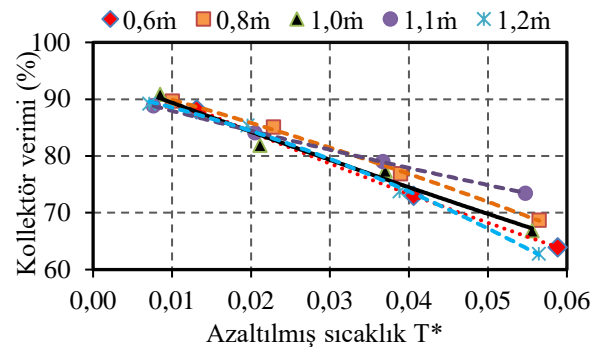
Toplam hata ölçülen debinin, sıcaklık ve ışınım şiddetinin ölçüm hatalarını kapsamakta olup kollektör veriminde maksimum hata %11,4 olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 3.** Kullanılan ölçüm cihazları ve hassasiyetleri (Measuring instruments and their sensitivities)

Ölçüm cihazı	Kullanım amacı	Hassasiyeti
Pt100	Akışkan sıcaklık ölçümü	$\pm 0,05$
K tipi termokupl	Çevre sıcaklığı ölçümü	$\pm 0,05$
Krohne hacimsel debimetre	Debi ölçümü	$\pm \%1,16$
Autrol APT3100	Basınç farkı ölçümü	$\pm \%0,075$
Ahlborn FLA613-GS	Işınım şiddeti ölçümü	$\pm \%10$

### 3. BULGULAR (FINDINGS)

Deneyler 5 farklı debide ve kollektöre giriş sıcaklığı da  $25^\circ C$ ,  $40^\circ C$ ,  $60^\circ C$  ve  $80^\circ C$  sıcaklıklarında yapılmış, ölçümler standarda uygun olarak dörder defa tekrarlanmıştır. Deneyler süresince çevre sıcaklığı  $20-25^\circ C$  arasında değişmiştir. Kollektörde akışkan debisiyle verimdeki değişimi gözlemlemek için standarda uygun olarak kollektör açıklık alanına göre birim alan için akışkan debisi  $0,02 \text{ kg/s m}^2$  referans alınarak, uygulanan debi %60 (0,6 $\dot{m}$ ), %80 (0,8 $\dot{m}$ ), %100 (1,0 $\dot{m}$ ), %110 (1,1 $\dot{m}$ ) ve %120 (1,2 $\dot{m}$ ) oranında alınmıştır. Açıklık alanı kullanılarak farklı akışkan debileri için kollektör veriminin değişimi Şekil 5’te verilmiştir.



**Şekil 5.** Açıklık alanına göre, farklı debilerdeki kollektör veriminin değişimi (Variation of the collector efficiency at different mass flow rate according to the aperture area)

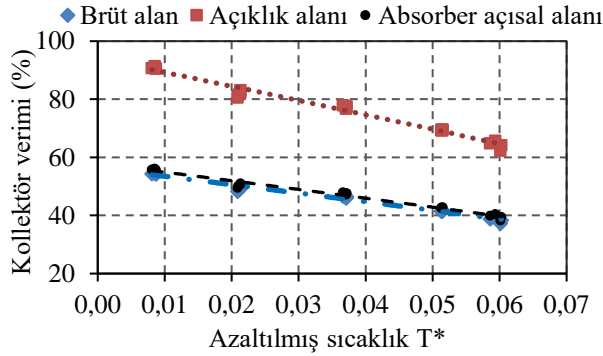
Şekil 5’te grafikleri verilen farklı debilerdeki kollektör veriminin akışkan debisi ile değişimini veren eşitlikler Çizelge 4’te verilmiştir. Şekil 5’te görüldüğü gibi azaltılmış sıcaklığın ( $T^*$ ) düşük değerlerinde, debi değişiminin kollektör üzerindeki etkisi daha az, yüksek  $T^*$  değerlerinde ise daha fazladır. Örneğin azaltılmış sıcaklığın 0,01 değeri için farklı debilerde kollektör verimi %88 ile %90 arasında, 0,05 için de %67 ile %74 arasında değiştiği gözlenmiştir.

Literatürdeki bazı çalışmalarda U-borulu kollektör verimleri standart debi değeri için kollektör açıklık alanına bağlı olarak %70 ile %53 arasında [7], bir başka çalışmada %75 ile %66 arasında [11] hesaplanmıştır. Bu çalışmada ise standart debi için açıklık alanına bağlı verim %90 ile %67 arasında değişmektedir.

**Çizelge 4.** Debi ile kollektör verimindeki değişiklik (Change in the collector efficiency with the flow rate)

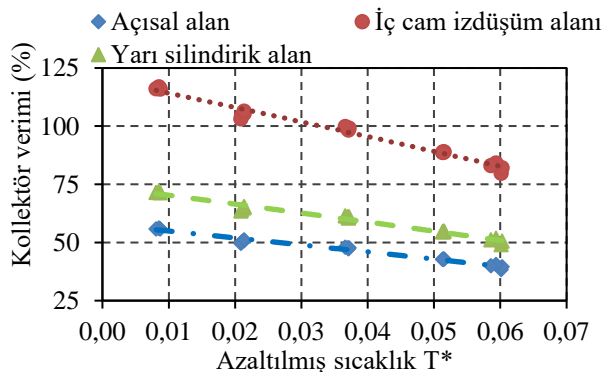
Uygulanan debi /Standart debi	Eşitlik
0,6 $\dot{m}$ (%60)	$\eta = 1272,4x^2 - 623,0x + 96,2$
0,8 $\dot{m}$ (%80)	$\eta = -1370,9x^2 - 366,8x + 93,7$
1,0 $\dot{m}$ (%100)	$\eta = 708,3x^2 - 531,7x + 94,6$
1,1 $\dot{m}$ (%110)	$\eta = 809,5x^2 - 375,2x + 91,6$
1,2 $\dot{m}$ (%120)	$\eta = -3958,9x^2 - 295,5x + 91,9$

Standart debide (1,0m) farklı alanlar kullanılarak oluşturulan verim eğrileri Şekil 6'da verilmiştir. Her durum için toplanan ısı enerjisi sabittir, kullanılan alan türü değiştirildiğinde kolektör veriminin değeri de değişir. Literatürde bu alanların birçoğu kullanılmakla birlikte en yaygın olarak kolektör açıklık alanı kullanılmaktadır.



Şekil 6. Farklı kolektör alanlarına göre verimin değişimi (Variation of the efficiency with different collector areas)

Farklı absorber alanları referans alınarak hesaplanan verimler Şekil 7'de verilmiştir. Kolektörün standart akışkan debisinde, 25 °C akışkan giriş sıcaklığında, iç cam iz düşüm alanı, yarı silindirik alanı ve açılmal yüzey alanı ile hesaplanan verimleri sırasıyla %116, %72 ve %56'dır. Görüldüğü gibi iç cam iz düşüm alanıyla hesaplanan verim %100'den büyük olmakta ve kullanılan alanda problem olduğu görülmektedir. Bu durum güneş simülöründe yapılan çalışmalarda, verim hesabında kullanılacak alanın belirlenmesinin önemini ortaya koymaktadır. Kolektör veriminin tespitinde kullanılan alan değiştiğinde sadece sayısal değer değişmekte olup eğrinin karakteristiği değişmemektedir. Eğer ışınların geldiği alan daha küçük alınırsa verim yüksek, alan büyük alınırsa verim de düşük çıkacaktır. Asıl sorun verim eğrisinin projelendirme amacıyla kullanılmasında yaşanabilecektir.

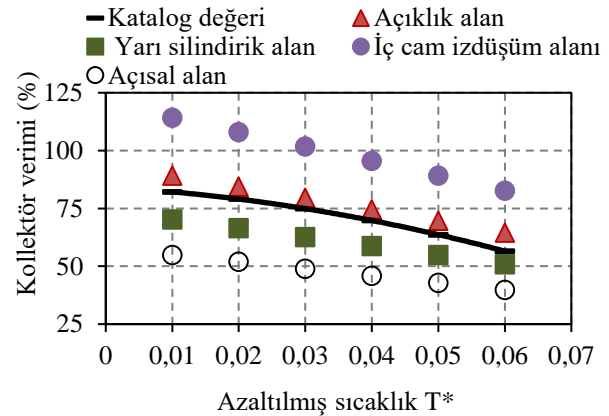


Şekil 7. Farklı absorber alanlarına göre kolektör veriminin değişimi (Variation of the collector efficiency according to different absorber areas)

Şekil 8'de deneysel çalışmada kullanılan güneş kolektörünün katalogunda verilen verim eşitliği ile bu çalışmada elde edilen farklı alan tanımlarına göre elde edilen verim eğrileri karşılaştırılmıştır. Ürün katalogunda verim eğrisinin hangi alana göre oluşturulduğu belirtilmemiştir. Şekil incelendiğinde atölye ortamında güneş simülöründe yapılan test sonuçlarından kolektör açıklık alanına göre elde edilen verim değerlerinin katalogta verilen değerlerden ortalama %9 daha fazla olduğu görülmüştür.

Katalogda verilen verim eğrisi:  $y = -50,146x^2 - 1,6157x + 0,8428$

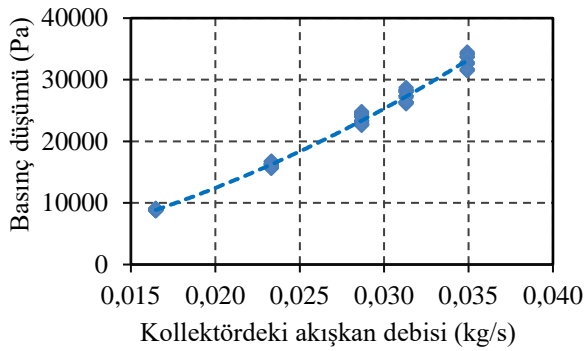
Bu çalışmada türetilen verim eğrisi:  $y = -302,039x^2 - 471,752x + 94,024$



Şekil 8. Farklı alan tanımlamalarının katalog değeri ile karşılaştırılması (Comparison of different area definitions with catalog value)

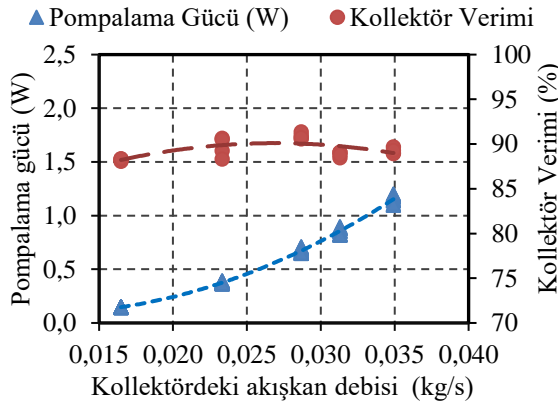
Güneş kolektörlerinin en önemli özelliklerinden olan verim eğrileri ile birlikte kolektördeki basınç düşümü de önemli bir parametre olarak projelendirme aşamasında kullanılır. Kullanılan U-borulu kolektörü için ölçülen basınç düşümü değerleri Şekil 9'da verilmiştir. Basınç düşümü akışkan debisi ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Çalışmada kullanılan kolektör boruları seri bağlantılı olması basınç kaybını standart kolektörlere oranla büyük ölçüde artırmaktadır. Ticari olarak bulunan bazı U-borulu kolektörler için basınç düşümü değerleri literatürde 14, 15, 16 ve 20 vakum tüp sayısı için verilmiştir. Karşılaştırma amacıyla literatürdeki 17 vakum tüp için karşılık gelen basınç düşümü farklı ürünler için 1,3 ile 1,7 kPa arasında [26, 27] değiştiği görülmüştür. Deneysel ölçümleri yapılan kolektörde standart debideki basınç düşümü ise 23,8 kPa olarak bulunmuştur. Buradaki büyük farkın nedeni; literatürden alınan değerlerin paralel bağlantılı U-borular için, bu çalışmada elde edilen sonuçların ise seri bağlantılı U-borular için olmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan ölçümlerle, basınç düşümü ile debi arasındaki ilişki belirlenmiş ve Eşitlik 8'de verilmiştir.

$$\Delta P = 20357525,2 \text{ m}^2 + 269865,9 \text{ m} - 1112,8 \quad (8)$$



Şekil 9. Farklı debilerde kollektördeki basınç düşümü (Pressure drops in the collector at different flow rates)

Şekil 10'da kollektördeki basınç düşümünden kaynaklanan pompalama gücündeki artışın akışkan debisiyle değişimi 25 °C'deki kollektör veriminin değişimiyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 10. Pompalama gücü ve kollektör veriminin akışkan debisiyle değişimi (Pumping power and collector efficiency change with the flow rate)

Şekilde görüldüğü gibi 0,029 kg/s akışkan debisine kadar (yaklaşık standart debi) artan debi ile verim değeri de artmış, bu noktadan sonra ise pompalama gücündeki artış devam etmiş, kollektör verimi ise azalmaya başlamıştır.

Kollektördeki basınç düşümüne karşılık gelen gerekli pompalama gücü  $P_G$  (W) Eşitlik 9'dan [28] bulunur.

$$P_G = \dot{V} \Delta P \quad (9)$$

Burada,  $\Delta P$  (Pa) deneysel çalışmada kollektör girişi ile çıkışı arasında ölçülen basınç düşümünü,  $\dot{V}$  ( $m^3/s$ ) hacimsel debiyi ifade etmektedir.

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Tasarım ve üretimi yapılan güneş simülatöründe vakum tüplü U-borulu bir güneş kollektörünün test edilmesi çalışılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Standart debide iç cam izdüşüm alanına bağlı kollektör verimi %116 ile %80 arasındayken, gerçek absorber alanına (açısal alan) göre kollektör verimi %56 ile %40

arasında değişmektedir. İç cam izdüşüm alanı kullanımının yanıtıcı sonuçlar verdiği görülmüştür.

- Güneş simülatörleriyle kollektör verim eğrileri oluşturulurken gerçek açıl alan ile brüt alan birbirlerine yakın sonuçları vermektedir. Katalog verilerine en yakın olarak da kollektör açıklık alanına göre elde edilen verim eşitliği olmuştur. Kollektör testleri raporlanırken alan tanımlamaları mutlaka verilmelidir.

- Kollektördeki akışkan debisi arttıkça basınç düşümü de artmakta, göreceli olarak akışkan debisi ile verimde de bir artış gözlenmektedir.

- Farklı akışkan debilerinin kollektör verimine etkisi, basınç kayıpları ve pompalama gücü birlikte değerlendirildiğinde standart debi veya %10 fazlasının kullanılmasının uygun olacağı görülmüştür.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Süleyman Demirel Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 4680-YL1-16 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yaghoubi M., Ahmadi F. and Bandehee M., "Analysis of heat losses of absorber tubes of parabolic through collector of Shiraz (Iran) solar power plant", *Journal of Clean Energy Technologies*, 1, 1: 1729-1734, (2013).
- [2] Gao Y., Zhang Q., Fan R., Lin X. and Yu Y., "Effects of thermal mass and flow rate on forced-circulation solar hot-water system: comparison of water-in-glass and U-pipe evacuated-tube solar collectors", *Solar Energy*, 98: 290-301, (2013).
- [3] Ong K.S. and Tong W.L., "System performance of U-tube and heat pipe solar water heaters", *Journal of Applied Science and Engineering*, 15/2, 105-110, (2012).
- [4] Pei G., Li G., Zhou X., Ji J. and Su Y., "Comparative experimental analysis of the thermal performance of evacuated tube solar water heater systems with and without a mini-compound parabolic concentrating (CPC) reflector ( $C<1$ )", *Energies*, 5: 911-924, (2012).
- [5] Aboulmagd A., Padovan A., Oliveski R. and Col D. "A new model for the analysis of performance in evacuated tube solar collectors", *3rd International High Performance Buildings Conference*, Paper 142, 3559, (2014).
- [6] Ma L., Lu Z., Zhang J. and Liang R., "Thermal performance analysis of the glass evacuated tube solar collector with U-tube", *Building and Environment*, 45: 1959-1967, (2010).
- [7] Gao Y., Fan R., Zhang X.Y., An Y.J., Wang M.X., Gao Y.K. and Yu Y., "Thermal performance and parameter analysis of a U-pipe evacuated solar tube collector", *Solar Energy*, 107: 714-727, (2014).
- [8] Ong K.S., Li T.W. and Cheong D., "Performance of U-tube solar water heaters facing different directions", *Journal of Energy and Power Engineering*, 7: 1729-1734, (2013).



- [9] Liang R., Ma L., Zhang J. and Zhao D., "Performance analysis of a new-design filled-type solar collector with double U-tubes", *Energy and Buildings*, 57: 220-226, (2013).
- [10] Liang R., Zhang J., Zhao L. and Ma L., "Research on the universal model of filled-type evacuated tube with U-tube in uniform boundary condition", *Applied Thermal Engineering*, 63: 362-369, (2014).
- [11] Liang R., Ma L., Zhang J. and Zhao D., "Theoretical and experimental investigation of the filled type evacuated tube solar collector with U-tube", *Solar Energy*, 85: 1735-1744, (2011).
- [12] Shatat M., Riffat S. and Agyenim F., "Experimental testing method for solar light simulator with an attached evacuated solar collector", *International Journal of Energy and Environment*, 4: 2, 219-230, (2013).
- [13] Shatat M., Mayere A. and Riffat S., "A standardized empirical method of testing solar simulator coupled with solar tube and concentrator collectors", *International Journal of Thermal and Environmental Engineering*, 5: 1, 13-20, (2013).
- [14] Ozsoy A., Demirer S. and Adam N.M., "An experimental study on double-glazed flat plate solar water heating system in Turkey", *Applied Mechanics and Materials*, 564: 204-209, (2014).
- [15] Rodríguez-Hidalgo M. C., Rodríguez-Aumente P. A., Lecuona A., Gutiérrez-Urueta G. L., and Ventas R., "Flat plate thermal solar collector efficiency: Transient behavior under working conditions. Part I: Model description and experimental validation", *Applied Thermal Engineering*, 31: 2394-2404, (2011).
- [16] Li X., Dai Y.J., Li Y. and Wang R.Z., "Comparative study on two novel intermediate temperature CPC solar collectors with the U-shape evacuated tubular absorber", *Solar Energy*, 93: 220-234, (2013).
- [17] Selvakumar P., Somasundaram P. and Thangavel P., "Performance study on evacuated tube solar collector using Therminol D-12 as heat transfer fluid coupled with parabolic trough", *Energy Conversion and Management*, 85: 505-510, (2014).
- [18] Wang P., Guan H., Liu Z., Wang G., Zhao F. and Xiao H., "High temperature collecting performance of a new all-glass evacuated tubular solar air heater with U-shaped tube heat exchanger", *Energy Conversion and Management*, 77: 315-323, (2014).
- [19] Liu Z., Hu R., Lu L., Zhao F. and Xiao H., "Thermal performance of an open thermosyphon using nanofluid for evacuated tubular high temperature air solar collector", *Energy Conversion and Management*, 73: 135-143, (2013).
- [20] Zambolin E. and Del Col D., "Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions", *Solar Energy*, 84: 1382-1396, (2010).
- [21] Fraunhofer-Institute for Solar Energy Systems, "Efficiency test according to EN 12975-2:2002. Test Report: KTB No. 2005-07-en", (2005).
- [22] TS EN ISO 9806, "Güneş enerjisi- Güneş kolektörleri- Deney metotlar", (2014).
- [23] TS ISO 9459-1, "Güneş enerjisiyle ısıtma-Konut su ısıtma sistemleri-Bölüm 1: İç ortam deney metotları kullanılarak performans değerlendirme işlemi", (1999).
- [24] TS ISO 9459-2, "Güneş enerjisi - Konut su ısıtma sistemleri - Bölüm 2: Sadece güneş enerjili sistemlerin yıllık performans tahmini ve sistem performans karakteristikleri için dış ortam deney metodu", (2000).
- [25] [www.sunmax.com.tr/index.php?t=urd&u=1&uk=9&i=11](http://www.sunmax.com.tr/index.php?t=urd&u=1&uk=9&i=11)
- [26] [www.himinsun.com/2-1-u-pipe-solar.html](http://www.himinsun.com/2-1-u-pipe-solar.html)
- [27] [www.himinsun.com/4-5-u-pipe-solar-collector.html](http://www.himinsun.com/4-5-u-pipe-solar-collector.html)
- [28] Keklikcioglu O. and Ozceyhan V., "Experimental investigation on heat transfer enhancement of a tube with coiled-wire inserts installed with a separation from the tube wall", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 78: 88-94, (2016).



**POLİTEKNİK DERGİSİ**  
**JOURNAL of POLYTECHNIC**

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)  
URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

**R260 çeliklerinin işlenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, güç tüketimi ve makine gürültüsü üzerine etkileri**  
*Effect of the cutting parameters on surface roughness, power consumption and machine noise in machining of R260 steel*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Şener KARABULUT<sup>1</sup>, Abidin ŞAHİNOĞLU<sup>2</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0001-6384-8162

*ORCID<sup>2</sup>:* 0000-0003-0040-442X

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Karabulut Ş. ve Şahinoğlu A., "R260 çeliklerinin işlenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, güç tüketimi ve makine gürültüsü üzerine etkileri", *Politeknik Dergisi*, 21(1) : 237-244, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.371299

# R260 Çeliklerinin İşlenmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü, Güç Tüketimi ve Makine Gürültüsü Üzerine Etkileri

*Araştırma Makalesi /Research Article*

**Şener KARABULUT<sup>1\*</sup>, Abidin ŞAHİNOĞLU<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Hacettepe ASO 1.OSB Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, ANKARA

<sup>2</sup>Çankırı Karatekin Üniversitesi Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, ÇANKIRI

(Geliş/Received : 09.11.2017 ; Kabul/Accepted : 08.12.2017)

## ÖZ

Hadfield çelikleri yüksek aşınma direncine, tokluğa, yüksek akma ve çekme mukavemetine sahip malzemelerdir. Ray çelikleri olarak da bilinen Hadfield çelikleri aşınma, darbe ve yorulma dayanımından dolayı çoğunlukla demiryolu ulaşımında kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Hadfield çeliklerinin işleme davranışı ve işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, makine gürültüsü ve güç tüketimi üzerindeki etkisi kuru işleme koşullarında yatay freze tezgâhı kullanılarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar, ağır işleme koşullarında sabit kesme hızı, dört farklı ilerleme hızı ve altı farklı talaş derinliğinde ve gerçek bir üretim ortamında yapıldı. Frezeleme değişkenlerinin yüzey pürüzlülüğü, makine gürültüsü ve güç tüketimi üzerindeki etkisi varyans analizi (ANOVA) kullanılarak değerlendirildi. Deneysel sonuçlar, kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en önemli kesme parametresi olduğunu göstermiştir. Kesme derinliğinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değeri belirgin şekilde iyileşmiştir. Güç tüketimi ve makine gürültüsü, deneylerde kullanılan artan ilerleme hızı ve kesme derinliği değerlerinin artmasından etkilenmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Hadfield çeliği, Sert frezeleme, yüzey pürüzlülüğü, makine gürültüsü, güç tüketimi.

# Effect of the Cutting Parameters on Surface Roughness, Power Consumption and Machine Noise in Machining of R260 Steel

## ABSTRACT

Hadfield steels are the materials having with high wear resistance, toughness, high yield and tensile strength. Hadfield steels, also known as rail steels, are commonly used for rail transport due to their wear, impact and fatigue strength. In this study, machining behavior of the Hadfield steels and the effect of the machining parameters on surface roughness, machine noise and power consumption were investigated under dry cutting conditions using horizontal milling machine. Experimental studies were carried out a real production environment using constant cutting speed, four different feed rate and six different depth of cut under heavy machining conditions. The influence of the milling variables on surface roughness, machine noise and power consumption were evaluated by using Analysis of variance (ANOVA). The experimental results showed that the depth of cut was the most significant cutting parameter on the surface roughness. Surface roughness value was remarkably improved with increasing depth of cut. Power consumption and machine noise were affected from increasing feed rate and depth of cut values used in the experiments.

**Keywords :** Hadfield steel, hard milling, surface roughness, machine noise, power consumption

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ray çeliği olarak bilinen östenitik mangan çeliği (Hadfield çeliği), yüksek akma ve çekme dayanımı ile birlikte mükemmel aşınma direncine sahip tok ve manyetik olmayan bir alaşımdır. Uygulanan ısıl işlemlere bağlı olarak mekanik özelliklerinde iyileşmeler meydana gelmektedir. Yüksek aşınma dirençleri ve tok yapılarından dolayı demiryollarında, madencilik sektöründe, tank paletlerinde, pompa ekipmanlarında ve aşınma direnci gerektiren çeşitli mühendislik

uygulamalarında tercih edilmektedir [1,2]. Bununla birlikte, aşırı sertlik, düşük termal iletkenlik ve deformasyon sertleşmesi davranışından ötürü bu çeliğin işlenmesi oldukça zordur. Kesme sırasında oluşan yüksek kesme kuvvetleri, yüksek kesme sıcaklıkları ve kesici takım aşınması, hedeflenen iş parçası yüzey kalitesi ve boyut hassasiyetinin elde edilmesini zorlaştıran unsurlardır [3-4]. İmalat süreçlerinde, iş parçasının yüzey kalitesi ve boyutsal tamlığı, kesme parametrelerinden, kesici takım malzemesinden, takım geometrisinden, talaş oluşumundan ve kesme sırasında ortaya çıkan titreşimden büyük ölçüde etkilenir [5,6]. Daha uzun takım ömrüne sahip yüksek kaliteli bir iş

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

parçası ve daha sağlıklı ve güvenli bir çalışma ortamı işleme parametrelerinin doğru bir şekilde seçilmesi ve kesme işleminin doğrudan izlenmesiyle sağlanabilir. Bundan dolayı, araştırmacılar metal kesme işlemlerinde iş parçası yüzey kalitesi, takım aşınması, kesme kuvvetleri, titreşim ve kesme sıcaklıkları üzerinde kesme parametrelerinin ve kesme şartlarının etkilerini belirlemek için çok fazla sayıda çalışma yapmışlardır. Neşeli ve Yıldız [7] tornalama işleminde kesici takım yavaşlama açısı ve talaş açısına bağlı olarak meydana gelen kesici takım turlama titreşimlerinin iş parçası yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yazarlar, kesici takım giriş açısının artması ve negatif talaş açısının azalmasıyla birlikte turlama titreşiminin arttığını, titreşim artışına bağlı olarak iş parçası yüzey kalitesinin bozulduğunu rapor etmişlerdir. Kıvak [1], Hadfield çeliğinin frezeleme işlemi sırasında, kesme parametrelerinin takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmış ve en uygun frezeleme parametreleri için tahmin modeli geliştirmiştir. İş parçası yüzey kalitesi üzerinde en etkili parametrenin ilerleme hızı, takım aşınması üzerinde en etkili parametrenin kesme hızı olduğu rapor edilmiştir. Reck ve ark. [8] alüminyum malzemenin frezelenmesi sırasında tezgâhın ürettiği ses düzeyini mikrofon kullanarak ölçmüşlerdir. Yazarlar gürültü üzerinde en etkili parametrenin, iş parçasının mekanik özellikleri olduğunu, kesme hızı, ilerleme ve eksenel kesme derinliğinin, darbe enerjisini artırarak ses basıncını artırmaya eğilim gösterdiğini rapor etmişlerdir. Radyal talaş derinliğinin gürültü üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını gözlemlemişlerdir. Son yıllarda, takım tezgâhlarının işleme performansları artarken çevre ve operatörler üzerindeki İş Sağlığı ve Güvenliği sorunları da (İSG) gündeme gelmektedir. Operatörler iş ortamında tezgâhlar tarafından üretilen gürültünün meydana getirdiği sağlık problemleri ile karşı karşıya kalmaktadırlar. İşlenmesi zor parçaların imalatı sürecinde, operatörler birbirine yakın yerleştirilmiş çok sayıda makinenin ürettiği gürültüye maruz kalmaktadırlar [9-12]. Alüminyum ve mekanik özellikleri yüksek çelikler gibi malzemelerin freze tezgâhında işlenmesi sırasında 100 dBA'nın üzerinde bir gürültü oluşmaktadır. Bu nedenle imalat ortamlarında gürültü emisyonlarını azaltmak için frezeleme operasyonlarının üzerine odaklanmak gerekmektedir [13]. Bugüne kadar yapılan talaş kaldırma veya kesme işlemlerinde yapılan araştırmaların çoğu, gürültünün ana hedef olarak azaltılması olarak düşünülmüştür. Literatürde kesici takım aşınmasının izlenmesiyle ilgili çok sayıda çalışma bulunabilir, ancak çoğu çalışmada araştırmacılar işleme alanı dışındaki yüksek akustik frekansları (> 100 kHz) göz önüne almaktadır (maks. 1 ila 5 kHz arasındaki hassasiyet). Bazı araştırmacılar buna ek olarak, tezgâh titreşimlerini saptamak için ses emisyon analizini kullanmışlardır [14-16], ancak yine de ses basıncı seviyesi ile insanın işleme aralığı ilişkisine dikkat edilmemiş ya da gürültü maruziyet yasal eşiği

düşünülmüştür. Tekiner ve Yeşilyurt [16], AISI 304 çeliğin tornalanmasında kesme parametrelerinin tezgâh titreşimi, kesici takım aşınması, yüzey kalitesi ve tezgâh sesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar tezgâh güç tüketimi, tezgâh ses şiddeti, kesici takım aşınması ve yüzey kalitesi için en uygun kesme parametrelerini belirlemişlerdir. Şahinoğlu ve ark. [17] GGG50 dökme demir malzemenin torna tezgâhında işlenmesi sırasında ortaya çıkan titreşim ve ses şiddetinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar, ilerleme hızı artışına bağlı olarak tezgâh titreşiminin, ses şiddetinin ve yüzey pürüzlülük değerinin arttığını ifade etmişlerdir. Bir başka çalışmada, Şahinoğlu ve ark. [18], Al 7075 malzemenin torna tezgâhında işlenmesi sırasında oluşan titreşim ve yüzey pürüzlülüğünü araştırmışlardır. Araştırmacılar, titreşim ve iş parçası yüzey kalitesi üzerinde en etkili kesme parametresinin ilerleme hızı olduğunu, titreşim ve yüzey kalitesi arasında bir korelasyon bulunduğunu rapor etmişlerdir. Üretim işlemlerinde enerji tüketimi, üretim maliyeti ve çevre üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sealy ve ark. [19] sert parçaların hassas frezelenmesinde enerji tüketimini araştırmışlardır. Kesme hızı ve ilerleme hızı ile kıyaslandığında kesici takım aşınmasının özgül enerji tüketimi üzerinde en etkili faktör olduğunu belirlemişlerdir. Talaş kaldırma oranının enerji tüketimi üzerinde dikkate değer bir etkisinin olmadığını, ancak talaş kaldırma oranı arttıkça enerji tüketiminin de arttığını ifade etmişlerdir [20-24]. Metal kesme işlemlerinde kesme sıcaklığı, kesme parametrelerine bağlı olarak oluşur ve kontrol altında tutulmadığında kesici takım aşınmasına ve bunun bir sonucu olarak tezgâh güç tüketiminin artmasına sebep olur [25]. Toh'a [26] göre, metal kesme sırasında üretilen toplam ısının yaklaşık %80-90'ı talaş ile uzaklaştırılırken, yaklaşık %10-20'si iş parçasına dağılmaktadır. Toh, frezeleme sırasında, kesici takımın durumunu dolaylı olarak tanımlayacak olan talaş yüzey sıcaklığını kızıl ötesi teknik kullanarak ölçmüş, talaş sıcaklığının, kesici takım yan kenar aşınması ve eksenel talaş derinliğinin artmasıyla birlikte arttığını rapor etmiştir. Korkut ve ark. [27], takım talaş ara yüz sıcaklığının tahmini için regresyon analizi ve yapay sinir ağı modeli geliştirmiş ve deneysel olarak doğrulamışlardır. Önerilen tahmin modelinin yüksek doğrulukta olduğu ve takım talaş ara yüz sıcaklığının tahmin edilmesine uygun olduğu gözlenmiştir.

Literatür taramasından, yüzey pürüzlülüğü üzerinde, kesme parametrelerinin önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bunlarla birlikte kesme parametreleri ve işlenen malzemeye bağlı olarak enerji tüketimi ve tezgâhın ses seviyesi değişim göstermektedir. Bu çalışmada, ray çeliğinin işlenmesinde talaş derinliğinin ve dış başına ilerleme miktarının iş parçası yüzey pürüzlülüğü, tezgâh ses seviyesi ve güç tüketimi üzerindeki etkileri gerçek üretim ortamında deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerden elde edilen veriler varyans analizi (ANOVA) ile yorumlanmış, yüzey pürüzlülüğü, enerji tüketimi ve tezgâh ses şiddeti arasındaki ilişki incelenmiştir.

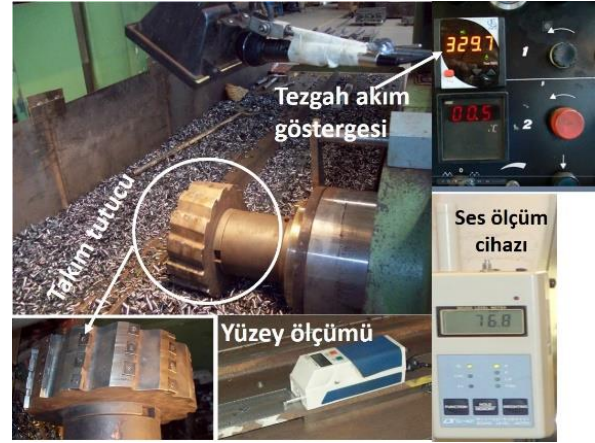
## 2. MALZEME VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Talaş kaldırma deneyleri; gerçek üretim ortamında Hadfield çeliği üzerinden yatay işleme merkezinde, kuru işleme şartlarında, 2400 mm uzunluğunda ray çeliği üzerinden yukarı yönlü (konvansiyonel) frezeleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, ısıl direnci yüksek, tok ve sert malzemelerin işlenmesinde kullanılan LNE424-117T03 J IN2045 karbür kesici uçlar kullanılmıştır. Talaş kaldırma işlemlerinde, Şekil 1'de görüleceği gibi 250 mm çapında tarayıcı başlık üzerine 42 adet kesici uç yerleştirilmiştir. Her talaş kaldırma deneyinde takım tutucu üzerinde bulunan kesici uçların yeni kenarları kullanılmıştır. Mitutoyo Surftest SJ210 yüzey pürüzlülük cihazı (Cut off length 2.5 mm) kullanılarak, işlenmiş yüzey boyunca beş farklı bölgeden yüzey pürüzlülük ölçümü yapılmış, istatistiksel olarak anlamlı sonuç elde etmek için maksimum ve minimum değerler atılarak geri kalan ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Çizelge 1'de sunulan ve deneylerde kullanılmış olan kesme parametreleri firmanın üretimde kullanmış olduğu değerlerdir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda firmanın kullanmış olduğu değerlere bağlı kalınmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan R260 ray çeliğine ait kimyasal kompozisyon ve sertlik değeri Çizelge 2'de sunulmuştur.

**Çizelge 1.** Frezeleme deneylerinde kullanılan kesme parametreleri (Cutting parameters used in the milling tests)

Kesme parametreleri	
Radyal kesme derinliği, $a_p$ (mm)	5–8–10–12–16–20
Dış başına ilerleme oranı, $f_n$ (mm/diş)	0.11–0.14–0.16–0.19
Kesme hızı, $V_c$ (m/min)	130
İş parçası boyutları, mm	2400 x 60
Eksenel talaş derinliği, $a_e$ (mm)	60
Kesici çapı, $D_c$ (mm)	250
Kesici diş sayısı, $z$ (adet)	42

Deneylerde talaş kaldırma işlemi sırasında tezgâhın harcamış olduğu güç tüketimi tezgâhın dijital göstergesinden takip edilmiş, kesme işleminin başlamasından bitimine kadar geçen zaman aralığı içerisinde okunan değerler not edilerek ortalaması alınmıştır. Tezgâhın talaş kaldırma işlemi sırasında kesme şartlarına bağlı olarak çıkarmış olduğu ses düzeyi LT lutron SL-401 model ses şiddeti ölçme cihazı ile ölçülmüştür. Cihazın ses ölçüm aralığı 30 – 130 dB, frekansı da 31.5 – 8.000 Hz arasındadır. Deneyler sırasında cihazın ekranında görülen veriler düzenli olarak takip edilmiş ve Excel sayfasına kaydedilmiştir. Kesme işleminin başlamasından bitimine kadar oluşan ses düzeylerinin ortalaması alınmıştır.



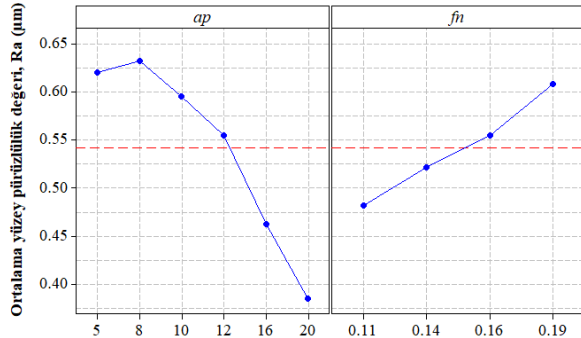
**Şekil 1.** Deney düzeneğinin genel görünümü (Overview of the experimental setup)

## 3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

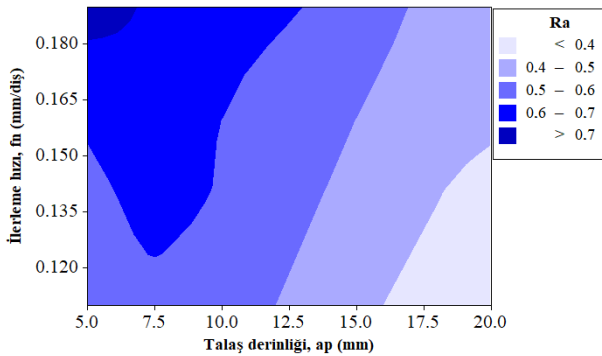
Bu çalışmada sabit kesme hızında, altı farklı talaş derinliğinde ve dört farklı ilerleme hızlarında kuru kesme şartlarında talaş kaldırma deneyleri yapılmıştır. Talaş kaldırma işlemleri gerçek üretim ortamında kullanılan kesme parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Üretimde kullanılan kesme parametrelerinin iş parçası yüzey pürüzlülüğü, tezgâh gürültüsü ve tezgâhın enerji tüketimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Şekil 2'de kesme parametrelerinin iş parçası yüzey pürüzlülüğü üzerindeki ortalama etkisi verilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan ray çeliğinin talaşlı imalatında yüzey kalitesi oldukça önemlidir. Yüzey kalitesinin iyi olması iş parçasının sürtünme ömrünü, yorulma mukavemetini ve korozyon direncini önemli oranda iyileştirmektedir. Şekil 2'de sunulan ortalama etki grafiği incelendiğinde talaş derinliğinin artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünde dikkate değer bir iyileşme meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun malzemenin özelliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Önceki çalışmalarda, Hadfield çeliklerinin kimyasal yapısından dolayı talaş kaldırma işlemi sırasında deformasyonla birlikte yüzeyde sertleşme meydana geldiği iyi bir yüzey pürüzlülüğü elde edildiği ifade edilmiştir [27, 28]. Dolayısıyla deneysel çalışmada kullanılan talaş derinliklerinde yapılan artışlara bağlı olarak, malzemenin özelliğinden dolayı iş parçası yüzeyinde deformasyon sertleşmesinin meydana geldiği ve bu durumun yüzey pürüzlülüğünü olumlu olarak etkilediği düşünülmektedir. Ayrıca, Şekil 1'de görüleceği üzere deneylerde kullanılan tarayıcı başlık on dört ağızlı ve her bir ağız boyunca üç adet kesici uç açılı olarak yerleştirilmiştir. Toplam kesme derinliği, ilerleme hızına bağlı olarak kesici ağızlar arasında dağılmaktadır. Artan kesme derinliği ile birlikte uç yarıçapının malzemeye tamamen battığı ve daha stabil bir kesme işlemi yaptığı düşünülmektedir. Bu durum yüzey pürüzlülük değerinin iyileşmesini sağlamıştır.

**Çizelge 2.** Kimyasal kompozisyon ve malzemenin sertlik değeri (Chemical composition and hardness value of the material)

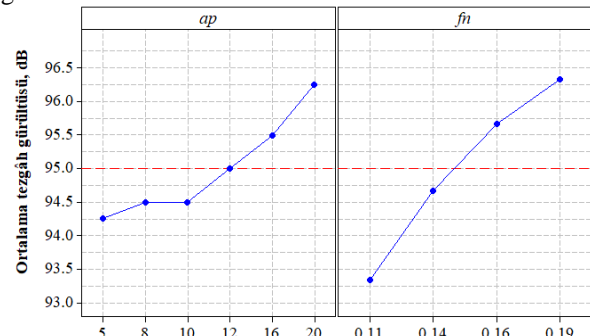
C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	V	Ni	Yüzey Sertliği, HBW
0.82	0.60	1.25	0.030	0.030	0.15	0.004	0.030	0.010	300

**Şekil 2.** Yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme parametrelerinin etkisi (The mean effect of cutting parameters on the surface roughness)

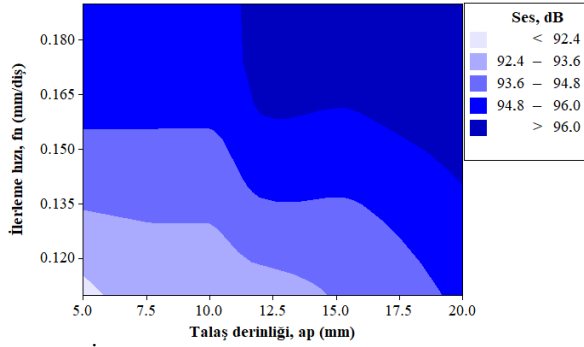
Yüzey pürüzlülüğünün ilerleme hızı ile değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün ilerleme hızındaki artış ile birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun, ilerleme hızındaki artışla birlikte kesme bölgesinde oluşan yüksek ısı sonucu ortaya çıkan takım aşınmasından kaynaklandığı söylenebilir [18, 31]. Şekil 3'te verilen kontur grafikte talaş derinliği ve ilerleme hızı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Grafikteki koyu bölgeler kesme şartlarına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiğini, açık bölgelerde ise yüzey pürüzlülüğünün iyileştiğini anlaşılmaktadır. Grafik kullanılarak yüzey pürüzlülüğü için en uygun kesme parametreleri belirlenebilir. 17 mm ile 20 mm talaş derinliği arasında ve 0,11 mm/rev ile 0,15 mm/diş diş başı ilerlemelerde en iyi yüzey pürüzlülüğünün elde edildiği görülmüştür. Kesme derinliğinin 20 mm'ye çıkması ile birlikte artan deformasyon sertleşmesine ve tırlama oluşumu azalmasına bağlı olarak daha yüksek ilerleme hızlarında daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde etmenin mümkün olduğu görülmüştür. Grafikten görüleceği üzere 15 mm talaş derinliğinde ve yüksek ilerleme hızlarında kesme işlemi yapıldığında 0,5 µm ile 0,6 µm aralığında kabul edilebilir bir Ra yüzey pürüzlülük değeri elde edildiği görülmektedir.

**Şekil 3.** İlerleme hızı ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi (The effect of feed rate and depth of cut on the surface roughness)

Ses haritalama; özellikle sosyal amaçlar için son yıllarda yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Endüstriyel ortamlarda çalışan kişileri meslek hastalıklarına karşı korumak için öncelikle atölye ortamındaki tezgâhların ürettiği olduğu gürültünün ve kesme parametrelerinin ses şiddeti üzerindeki etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca tezgâh ses şiddeti kesme parametrelerinin optimize edilmesinde de kullanılmaktadır. Bu çalışmada ray çeliğinin yüksek talaş derinliklerinde işlenmesi sırasında tezgâhın ürettiği ses şiddeti ölçülmüş ve kesme parametrelerinin gürültü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Şekil 4 deneylerde kullanılan kesme parametrelerinin tezgâh gürültüsü üzerindeki etkileri verilmiştir. Şekil 5'te ise kesme parametreleri içerisinde farklı kesme bölgelerindeki tezgâh ses şiddeti görülmektedir. Grafikten görüleceği üzere talaş derinliği ve diş başı ilerleme oranındaki artışa bağlı olarak tezgâh ses şiddetinde bir artış meydana gelmektedir.

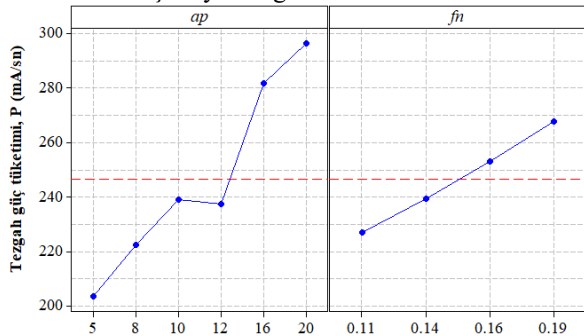
**Şekil 4.** Tezgâh gürültüsü üzerinde kesme parametrelerinin etkisi (The mean effect of cutting parameters on the machine noise)

Minimum ses şiddeti, en düşük talaş derinliğinde ve en düşük ilerleme hızında ölçülmüştür. Grafikler incelendiğinde ses şiddeti üzerinde ilerleme hızının oldukça etkili olduğu görülmektedir. Önceki çalışmalarda, ilerleme hızının artmasına bağlı olarak kesici takım yan kenar aşınmasının ve titreşimlerin arttığı, artan aşınma ve titreşim ile birlikte de tezgâh ses şiddetinin arttığı rapor edilmiştir [16-18]. Bu çalışmada kesici takım aşınması ve tezgâh titreşimleri ölçülmemiştir. Ancak önceki yapılan çalışmalar dikkate alındığında, ilerleme hızının artmasına bağlı olarak tezgâh ses şiddetinin artması, artan titreşim ve kesici takım aşınmasından kaynaklandığı düşünülebilir. Şekil 5'te verilen grafik incelendiğinde 15 mm talaş derinliğinde ve 0.13 mm/diş ilerleme hızına kadar maruziyet sınır değerlerine yakın bir gürültü oluştuğu görülmektedir. Aynı zamanda bu değerlerden kesici takım aşınması ve titreşim için de en uygun değerler olabileceği ifade edilebilir. Grafikteki koyu bölgeler ses şiddetinin en yüksek olduğu kesme aralıklarını, açık renkli bölgeler ise minimum ses düzeyi için en uygun kesme aralıklarını göstermektedir.



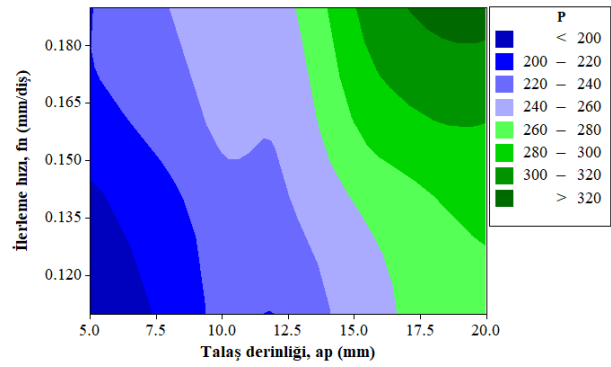
Şekil 5. İlerleme hızı ve talaş derinliğinin tezgâh sesi üzerindeki etkisi (The effect of feed rate and depth of cut on the machine sound)

Takım tezgâhları, iş parçasının mekanik özelliklerine ve iş mili devir sayısına bağlı olarak kesici takıma kesme hareketi sağlamak için enerji tüketirler. Kesme işleminde kullanılan kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliği iş parçasından talaş kaldırma oranını belirleyen üç temel işleme parametresidir. İlerleme hızı ve talaş derinliği arttıkça iş parçasından uzaklaştırılan talaş oranı da artar. İş parçasından kaldırılan talaş miktarına bağlı olarak kesme kuvvetleri de artar ve bu durum takım tezgâhının daha fazla enerji tüketmesine neden olur [32]. Şekil 6'da verilen grafik incelendiğinde ilerleme hızı ve talaş derinliğine bağlı olarak tezgâhın çekmiş olduğu akım miktarında artış meydana gelmektedir.



Şekil 6. Tezgâh enerji tüketimi üzerinde kesme parametrelerinin ortalama etkisi (The mean effect of cutting parameters on the machine power consumption)

Şekil 7'de verilen kontur grafik ise kesme parametrelerine bağlı olarak en uygun enerji tüketim bölgelerini belirlemek mümkündür. Grafiğe göre tezgâhın çekmiş olduğu akım oranı üzerinde talaş derinliğinin oldukça etkili olduğu görülmektedir. Yüksek talaş derinliğinde çalışılması gerektiğinde, tezgâhın daha az akım çekmesi için düşük ilerleme hızının tercih edilmesi gerekmektedir. Yüksek ilerleme hızlarında çalışması gerektiğinde ise talaş oranını azaltılması daha az enerji tüketimi ile sonuçlanacaktır. Deney sonuçlarına göre tezgâhın güç tüketimin oranını düşürmek için yüzey pürüzlülüğü ve tezgâh gürültü seviyelerini de dikkate alarak daha düşük ilerleme hızlarının ve talaş derinliğinin seçilmesi gerekebilir.



Şekil 7. İlerleme hızı ve talaş derinliğinin güç tüketimi (P) üzerindeki etkisi (The effect of feed rate and depth of cut on the power consumption)

### 3.1. Deneysel Sonuçların İstatistiksel Analizi (Statistical Analysis of the Test Results)

Yüzey pürüzlülüğü, tezgâh gürültü oranı ve enerji tüketimi üzerinde kesme parametrelerinin etki oranını değerlendirmek için varyans analizi (ANOVA) kullanılmış ve sonuçlar Çizelge 3'te verilmiştir. ANOVA sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin %72 etki oranı talaş derinliği olmuştur. Talaş derinliğinin artmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği görülmüştür. Talaş derinliğinden sonra yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin %20 etki oranı ile ilerleme hızı olmuştur. Diş başı ilerleme oranı artışı ile yüzey pürüzlülüğünde bozulma meydana gelmiştir. Çalışma ortamı gürültüsü bakımından kesme parametrelerinden ilerleme hızının tezgâh gürültüsü üzerinde %68 etki oranı ile en etkili kesme parametresi olduğu görülmüştür. Tezgâhın ürettiği ses şiddeti üzerinde talaş derinliğinin etki oranı %25 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde tezgâh güç tüketimi üzerinde talaş derinliğinin etki oranı %78 olarak gerçekleşirken ilerleme hızı %18 oranında bir etki göstermiştir.

$$R_a = 0.509223 - 0.0173908 \times ap + 1.58824 \times f_n \quad (1)$$

$$R - S_q = \% 92.41$$

$$\text{Ses} = 87.6547 + 0.136058 \times ap + 38.2353 \times f_n \quad (2)$$

$$R - S_q = \% 92.83$$

$$P = 92.7184 + 6.41153 \times ap + 521.078 \times f_n \quad (3)$$

$$R - S_q = \% 95.30$$

Yüzey pürüzlülüğü, tezgâh gürültüsü ve enerji tüketiminin tahmini için doğrusal regresyon modeli ile elde edilen elde edilen denklemler sırasıyla 1, 2 ve 3 nolu eşitliklerde verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için elde edilen regresyon modelinin  $R^2$  değeri %92.41; tezgâh gürültü oranı için  $R^2$  değeri %92.83 ve enerji tüketimi için  $R^2$  değeri %95.30 olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 3.** Deney sonuçlarının istatistiksel analizi (Statistical analysis of the test results)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	F	P	Etki oranı
Yüzey pürüzlülüğü						
ap	1	0.18	0.18	196.656	0	72%
fn	1	0.051	0.051	55.979	0	20%
Hata	21	0.019	0.019			8%
Toplam	23	0.251				
Tezgâh gürültüsü						
ap	1	11.021	11.021	73.337	0	25%
Vf	1	29.824	30	198.461	0	68%
Hata	21	3.156	2.979			7%
Toplam	23	44				
Tezgâh güç tüketimi						
ap	1	24472.8	24472.8	347.106	0	78%
Vf	1	5539.1	5539.1	78.562	0	18%
Hata	21	1480.6	1480.6			5%
Toplam	23	31492.5				

### 3.2 Doğrulama Deneyleri (Validation Experiments)

Frezeleme deneylerinden elde edilen ölçüm sonuçları, kesme derinliğinin artmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerinin iyileştiğini göstermiştir. Deneylerden elde edilen verilerin güvenilirliğini doğrulamak için farklı kesme derinliklerinde ve ilerleme hızlarında on adet kontrol deneyi yapılmıştır. Ayrıca kontrol deneylerinden elde edilen veriler ile doğrusal regresyon modelinin tahmin oranının kıyaslaması da yapılmıştır. Deneyler sonucu ölçülen yüzey pürüzlülüğü, tezgâh ses şiddeti ve güç tüketimi ile 1, 2 ve 3 nolu eşitliklerde verilen regresyon modellerinin üretmiş olduğu tahmin değerleri Çizelge 4’de verilmiştir. Doğrulama deneylerinden elde edilen ölçüm sonuçlarının, araştırmaya konu olan deneylerden elde

edilen veriler ile uyumlu olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü tahmininde regresyon modelinin istenilen düzeyde başarılı bir tahmin verisi üretmediği görülmüştür. Regresyon modeli ile yüzey pürüzlülük değeri %1 ile %42 arasında değişen (ortalama %21) hata oranlarında tahmin edilirken, tezgâh gürültüsü ve güç tüketimi sırasıyla %2 ve %5 ortalama hata oranı ile tahmin edilmiştir.

### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND SUGGESTIONS)

Bu çalışmada, R260 ray çeliğinin yatay freze tezgâhında kuru işleme şartları altında işlenmesinde ilerleme hızının ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü, tezgâh güç tüketimi ve tezgâh gürültüsü üzerindeki etkileri

**Çizelge 4.** Kontrol deneyleri (Verification experiments)

D.No	Kesme parametreleri		Deney değerleri			Tahmin değerleri			Hata oranı, (%)		
	ap (mm)	fn, (mm/diş)	Ra (µm)	Ses, (dB)	P (mA/sn)	Ra (µm)	Ses (dB)	P (mA/sn)	Ra	Ses	P
1	8	0.11	0.62	96	223	0.54	92.9	201.3	12%	3%	11%
2	8	0.14	0.92	97	225	0.59	94.1	217.0	36%	3%	4%
3	8	0.16	1.03	98	241	0.62	94.9	227.4	39%	3%	6%
4	8	0.19	0.78	97	249	0.67	96.0	243.0	14%	1%	2%
5	10	0.16	0.62	98	246	0.59	95.1	240.2	5%	3%	2%
6	16	0.11	0.4	94	268	0.41	94.0	252.6	1%	0%	6%
7	16	0.14	0.43	96	271	0.45	95.2	268.3	5%	1%	1%
8	28	0.11	0.34	98	340	0.20	95.7	329.6	42%	2%	3%
9	28	0.14	0.42	99	345	0.24	96.8	345.2	42%	2%	0%
10	28	0.14	0.36	99	403	0.24	96.8	345.2	32%	2%	17%



incelenmiştir. Deneysel sonuçları ortalama etki grafiği ve ANOVA kullanılarak yorumlanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- R260 ray çeliğinin işlenmesi sırasında radyal talaş derinliği artarken malzemede meydana gelen deformasyon sertleşmesine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünde dikkate değer bir iyileşme meydana gelmiştir. İlerleme hızının artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünün oldukça önemli olduğu ray çeliklerinde hassas bir yüzey kalitesi elde edebilmek için yüksek talaş derinliklerinde ve düşük ilerleme hızlarında frezeleme yapılması önerilmektedir.
- İlerleme hızında ve talaş derinliğinde meydana gelen artışla birlikte tezgâh gürültüsünde artış meydana gelmiştir. Ray çeliğinin talaşlı imalatı sırasında tezgâh gürültü seviyesini azaltmak için ilerleme hızının azaltılması önerilmektedir. Önceki çalışma sonuçlarına göre, ilerleme hızının azaltılması tezgâh titreşimlerinin ve kesici takım aşınmalarının da azalmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.
- İlerleme hızının ve talaş derinliğinin artışına bağlı olarak tezgâhin enerji tüketimi de artmıştır. Yüksek talaş derinliklerinde çalışılması durumunda ilerleme hızının düşürülmesi, yüksek ilerleme hızlarında çalışılması durumunda ise talaş derinliğinin azaltılması tezgâhin enerji tüketimini azaltacaktır.
- ANOVA sonuçları; yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerleme hızının etki oranının %72, talaş derinliğinin %20, tezgâh gürültüsü üzerinde ilerleme hızının %68, talaş derinliğinin %25, enerji tüketimi üzerinde talaş derinliğinin %78, ilerleme hızının ise %18 olduğunu göstermiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Araştırmacılar, bu deneysel çalışmanın yapılmasına vermiş olduğu destekten dolayı TCDD Çankırı Makas Fabrikası Müdürlüğü'ne teşekkür ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kıvak T., "Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts." *Measurement* 50: 19-28, (2014).
2. Kocabekir I., Tunca N., Özer O., Tümer C., Eker C.B., Özçelik S., Çuğ H., Ahlatcı H., "Demir Yolu Ray Sistemlerinde Kullanılan Hadfield Çeliğinin Aşınma Davranışı". 2. *Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'13)*, Karabük, Türkiye, 9-11 Ekim 2013.
3. Canadinc D., Sehitoglu H., Maier H. J., Chumlyakov Y. I., "Strain hardening behavior of aluminum alloyed Hadfield steel single crystals.", *Acta Materialia*, 53 (6): 1831-1842, (2005).
4. Horng, Jenn-Tsong, Nun-Ming Liu, and Ko-Ta Chiang. "Investigating the machinability evaluation of Hadfield steel in the hard turning with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC mixed ceramic tool based on the response surface methodology", *Journal of Materials Processing Technology*, 208(1): 532-541, (2008).
5. Ghani A. K., and Choudhury I. A., "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).
6. Şeker U., and Hasirci H., "Evaluation of machinability of austempered ductile irons in terms of cutting forces and surface quality", *Journal of Materials Processing Technology*, 173(3): 260-268, (2006).
7. Neşeli S. and Yıldız S., "Tornalamada Yaklaşma Açısı ve Talaş Açısına Bağlı Tırlama Titreşimlerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri" *Politeknik Dergisi*, 10 (4): 383 – 389, (2007).
8. Rech J., Dumont F., Le Bot A., Arrazola P. J., "Reduction of noise during milling operations", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 18: 39-44, (2017).
9. Weck M., and W Melder., "Problems in assessing the noise behavior of machine tools", *CIRP Annals* , 26 (2): 397, (1977).
10. Bley H., Günter K. G., Haeusler J., Noe E. L., Rosenkranz W., "Machine Concentration and Noise Annoyance in the Workshop", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 29(1): 269-273, (1980).
11. Bollinger J. G., "Noise - An industrial pollutant of international concern", *CIRP Annals*, 22(2): 197-202, (1973).
12. Hesselbach J., Hoffmeister H.-W., Schuller B.-C. and Loeis K., "Development of an active clamping system for noise and vibration reduction", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 59 (1): 395-398, (2010).
13. Quintana G., Ciurana J., Ferrer I. and Rodriguez C. A., "Sound mapping for identification of stability lobe diagrams in milling processes", *International journal of machine tools and manufacture*, 49 (3): 203-211, (2009).
14. Lu B. H., Lin Z. H., Hwang X. T., Ku C. H. And Tobisa S. A., "On-line identification of dynamic behaviour of machine tool structures during stable cutting", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 32(1): 315-318, (1983).
15. Ji C., Liu Z., and Ai X., "Effect of cutter geometric configuration on aerodynamic noise generation in face milling cutters", *Applied Acoustics*, 75: 43-5, (2014).
16. Tekiner Z., and Yeşilyurt S., "Investigation of the cutting parameters depending on process sound during turning of AISI 304 austenitic stainless steel", *Materials & Design*, 25(6): 507-513, (2004).
17. Şahinoğlu A., Güllü A., Dönertaş M. A., "GGG50 Malzemenin torna tezgâhında işlenmesinde kesme parametrelerinin titreşim , ses şiddeti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisinin araştırılması", *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2: 67-79, (2017).
18. Şahinoğlu A., Karabulut Ş., Güllü A., "Study on spindle vibration and surface finish in turning of Al 7075", *Solid State Phenomena. Trans Tech Publications*, 261: 321-327, (2017).
19. Sealy M. P., Liu Z. Y., Zhang D., Guo Y. B., and Liu Z. Q. "Energy consumption and modeling in precision hard milling", *Journal of Cleaner Production*, 135: 1591-1601, (2016).
20. Avram O. L. and Xirouchakis P., "Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system",

- Journal of Cleaner Production*, 19(6): 699-711, (2011).
21. Balogun V. A. and Mativenga P. T., "Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes", *Journal of Cleaner Production*, 41:179-186, (2013).
  22. Diaz N., Redelsheimer E. and Dornfeld D., "Energy consumption characterization and reduction strategies for milling machine tool use", *Glocalized solutions for sustainability in manufacturing*, 263-267, (2011).
  23. Diaz, Nancy, Elena Redelsheimer, and David Dornfeld. "Energy consumption characterization and reduction strategies for milling machine tool use." *Glocalized solutions for sustainability in manufacturing*, 263-267, (2011).
  24. Draganescu F., Gheorghe M. and Doicin C. V., "Models of machine tool efficiency and specific consumed energy", *Journal of Materials Processing Technology*, 141(1): 9-15, (2003).
  25. Bhuiyan M. S. H., Choudhury I. A., "Review of Sensor Applications in Tool Condition Monitoring in Machining", *Comprehensive Materials Processing* 13: 539-569, (2014).
  26. Toh C. K., "Comparison of chip surface temperature between up and down milling orientations in high speed rough milling of hardened steel", *Journal of Materials Processing Technology*, 167(1):110-118, (2005).
  27. Korkut, I., Acir A. and Boy M., "Application of regression and artificial neural network analysis in modelling of tool–chip interface temperature in machining", *Expert Systems with Applications*, 38(9): 11651-11656, (2011).
  28. Canadinc D. Sehitoglu, H., "Alüminyum Alaşımli Hadfield Çeliklerinde Aykırı Yerleşim Aktiviteleri". *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi* 5(2): 1-6, (2008).
  29. Özler L., Tosun N., İnan A., "Ostenitik Manganlı Çeliğin Sıcak Talaşlı İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün incelenmesi", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 24: 287-296, (2000).
  30. Özel T. Karpat Y., "Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks" *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45 (4): 467-479 (2005).
  31. Sarıkaya M., Abdulkadir G., "Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL", *Journal of Cleaner Production*, 65: 604-616 (2014).
  32. Kant G., Kuldip S. S., "Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining", *Journal of cleaner production*, 83: 151-164, (2014).



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

## Yeni Schiff bazı bileşiklerinin sentezi ve yapılarının aydınlatılması

### *Synthesis of new Schiff base compounds and identification of their structures*

Yazar(lar) (Author(s)): Emine Özge KARACA

ORCID: 0000-0003-2094-9742

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Karaca E. Ö., “Yeni Schiff bazı bileşiklerinin sentezi ve yapılarının aydınlatılması”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 245-249, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.382621

# Yeni Schiff Bazı Bileşiklerinin Sentezi ve Yapılarının Aydınlatılması

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Emine Özge KARACA**

Kataliz Araştırma ve Uygulama Merkezi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

(Geliş/Received : 03.07.2017 ; Kabul/Accepted : 15.09.2017)

## ÖZ

Schiff bazı bileşikler kararlı, kolay sentezlenebilen bileşiklerdir. Bunun yanı sıra, kimyanın pek çok alanında, endüstride, tıp ve eczacılıkta geniş kullanım alanlarına sahip olmaları bu bileşiklere olan ilgiyi artırmış, onları farklı alanlarda yaygın olarak kullanılabilir hale getirmiştir. Çalışma kapsamında suda çözünebilecek hale getirilmesi mümkün olan üç yeni Schiff bazı bileşiği sentezlenmiştir. Azot içeren aromatik aldehitlerin etilendiamin ile etanol içerisinde etkileştirilmesiyle elde edilen Schiff bazı bileşiği; 1,2-bis[1-metilindol-3-karboksilidenamino]jetan (**1a**), 1,2-bis[*p*-diethylaminobenzilidenamino]jetan (**1b**) ve 1,2-bis[*p*-di(oksobütül)aminobenzilidenamino]jetan (**1c**)'nin yapıları <sup>1</sup>H, <sup>13</sup>C NMR spektroskopisi, FT-IR ve elementel analiz teknikleri kullanılarak aydınlatılmıştır. Yapıları aydınlatılan bileşiklerin FT-IR ve NMR analiz sonuçları incelendiğinde imin oluşumunu kanıtlayan karakteristik piklerin varlığı gözlenmiş ve bileşiklerin sentezi başarıyla gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Schiff bazı, sentez, karakterizasyon.

## Synthesis of New Schiff Base Compounds and Identification of Their Structures

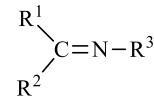
### ABSTRACT

Schiff base compounds are stable, readily synthesizable compounds. Besides, in many fields of chemistry having a wide use field in, industry, medicine and pharmacy has increased the interest in these compounds and made them widely available in different fields. Within the scope of the study, three new Schiff base compounds have been synthesized which can be dissolved in water. Schiff base compound by reacting nitrogen-containing aromatic aldehydes with ethylene diamine in ethanol; 1,2-bis[1-methylindole-3-carboxylidenamino]ethane (**1a**), 1,2-bis[*p*-diethylaminobenzylideneamino]ethane (**1b**), 1,2-bis[*p*-di(oxobutyl)aminobenzylidenamino]ethane (**1c**) synthesized and characterized by <sup>1</sup>H, <sup>13</sup>C NMR spectroscopy, FT-IR and elemental analysis techniques. When FT-IR and NMR analysis results of the synthesized compounds were examined, the presence of characteristic peaks proving the formation of imine was observed and the synthesis of the compounds was successful.

**Keywords:** Schiff base, synthesis, characterization

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İlk olarak 1864 yılında Nobel ödüllü Alman kimyager Hugo Schiff tarafından sentezlenen Schiff bazları (Şekil 1.), aldehit veya ketonların aminlerle nükleofilik katılma tepkimesi sonucu elde edilen ve karbon azot çifte bağı (-CH=N-) içeren bileşiklerdir [1]. Aldehit ile tepkimesi sonucu oluşan bağ azometin ya da aldimin olarak adlandırılırken, keton ile tepkimesi sonucu oluşan bağ imin veya ketimin olarak adlandırılır. Kararlı ve kolay sentezlenebiliyor olmaları nedeniyle Schiff bazları (iminler) ilgi duyulan bileşikler arasına girmeyi başarmıştır. İminlere olan bu ilgi birçok biyolojik sistemde [2], kimyasal katalizde [3], tıp ve eczacılık alanlarında [4], kimyasal analizlerde ve yeni teknolojilerde kullanılabilir olmaları ile açıklanabilir [5,6].



R<sup>1</sup>, R<sup>2</sup>, R<sup>3</sup>= alkil ya da aril

**Şekil 1.** Schiff bazlarının genel gösterimi (General display of Schiff bases)

Koordinasyon bileşiklerinin gerek biyolojik sistemler gerekse endüstride ki önemi her geçen gün artmaktadır. Schiff bazları da yapısal ve biyolojik özelliklerinden dolayı koordinasyon kimyasında yaygın olarak kullanılan ligantlar arasında yer almaktadır. Ligant olarak kullanımı ilk olarak 1933 yılında Pfeiffer tarafından bildirilen Schiff bazlarının metal kompleksleri ilgi ile çalışılmaktadır [7,8].

Metal-imin kompleksleri, antitümör ve herbisidal olarak kullanım nedeniyle yaygın şekilde araştırılmıştır [9]. Hematopoietik sistem üzerinde koruyucu etki gösterdikleri bildirilmiştir [10]. Antiviral olarak kullanımının yanında antibakteriyel ve antifungal ajanlar

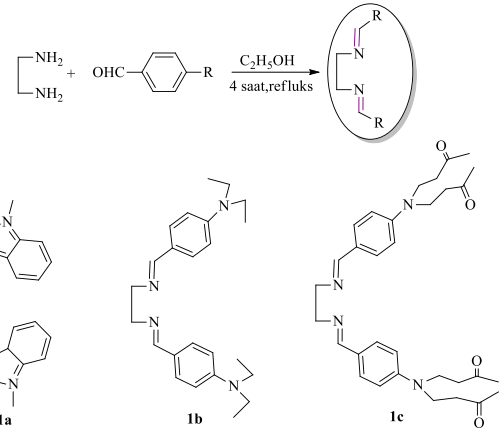
\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : emine.ozcan@inonu.edu.tr

olarak kabul edilmektedirler. Ayrıca diyabet ve AIDS tedavisinde de kullanılmaktadır [11-13]. Bunların yanında Schiff bazları korozyon önleyici [14], kation taşıyıcı, iyon seçici elektrot yapımı [15], boya endüstrisi [16] gibi çok sayıda alanda kullanımı mevcuttur.

Bu çalışmada azot içeren, bu özelliği sayesinde suda çözünabilir hale getirilebilecek, yeşil kimyaya uygun üç yeni Schiff bazı bileşiği sentezlenmiş, yapıları spektrokimyasal yöntemlerle aydınlatılarak literatüre katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

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

Sentezlenen bazı bileşikler havanın nemine ve oksijene karşı hassas olduklarından dolayı tüm deneyler inert atmosfer ortamında gerçekleştirildi ve tepkimelerde Schlenk tekniği kullanıldı. Tepkimelerde kullanılan cam malzemeler kullanılmadan önce vakum uygulanıp ısıtılarak içerisindeki nem ve oksijen uzaklaştırıldı ve daha sonra argon gazıyla dolduruldu. Tepkimelerde kullanılan reaktifler Sigma Aldrich ve Merck firmalarından ticari olarak satın alındı. NMR spektrumları, Bruker marka Avance III model, 400 MHz NMR'sinde İnönü Üniversitesi Kataliz Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde alındı. Çözücü olarak DMSO-D<sub>6</sub>, iç standart olarak TMS kullanıldı. Eşleşme sabitleri (*J* değerleri) Hertz olarak verildi. NMR katlılıkları şöyle kısaltıldı: s=singlet, d=dublet, t=triplet, heptet=hept., m=multipllet sinyal. FT-IR spektrumları Perkin Elmer Spektrum 100 spektrometresinde 400-4000 cm<sup>-1</sup>

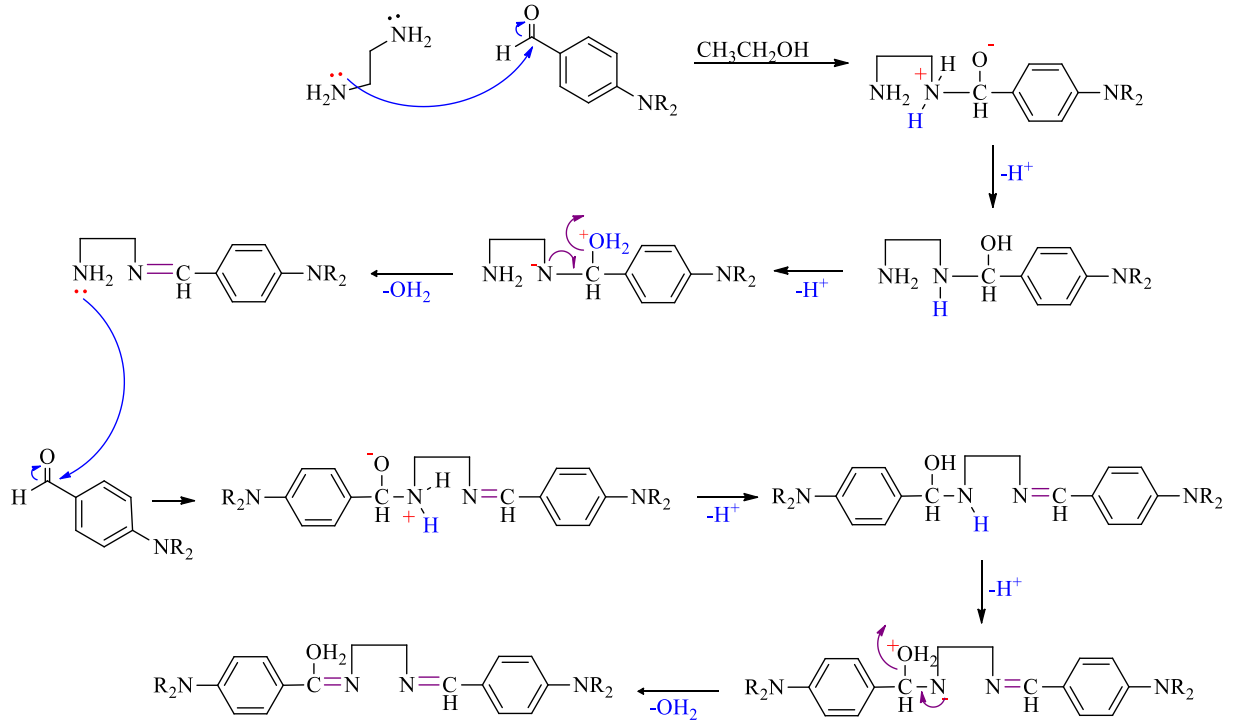


Şekil 2. Schiff bazlarının Sentezi (Synthesis of Schiff Bases)

aralığında alındı. Erime noktaları elektrotermal erime noktası tayin cihazı Stuart SMP 40 otomatik erime noktası tayin cihazıyla belirlendi.

### 2.1. Schiff bazlarının sentezi (Synthesis of Schiff bases):

Aldehit (2 mmol) etil alkolde (25 mL) tamamen çözülerek içerisine etilendiamin (1 mmol) eklendi. İnter ortamda 4 saat kaynatıldıktan sonra alkolün yarısı vakumda uzaklaştırıldı ve dietiler eklenerek kristallendirildi (Şekil 2.). Elde edilen kristaller süzülerek dietilerle yıkandı ve vakumda kurutuldu.



Şekil 3. Schiff bazlarının reaksiyon mekanizması (Reaction mechanism of Schiff base)

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Karbonil bileşikleriyle primer aminlerin tepkimesinden elde edilen Schiff bazlarının sentezi ayrılma ve katılma basamakları olmak üzere iki ana basamakta gerçekleşir. Öncelikle primer aminle karbonil grubunun kondensasyonundan bir karbonilamin ara bileşiği meydana gelir daha sonra bu ara bileşiğin dehidratasyonundan Schiff bazı elde edilir [17]. Sentezlenen Schiff bazlarının oluşum mekanizmasının gösterimi Şekil 3'de verilmiştir [18].

Sentezlenen Schiff bazları etanolde etilendiamin ve aldehitlerin etkileştirilmesiyle yüksek verimlerle elde edilmiştir (%85-92). Schiff bazlarına ait erime noktası, FT-IR, verim, element analizi,  $^1\text{H}$  ve  $^{13}\text{C}$  NMR analiz sonuçları Çizelge 1-3'de verilmiştir.

Schiff bazlarında C=N gerilme titreşimlerinin genellikle  $1610-1640\text{ cm}^{-1}$ 'de keskin bir pik halinde gözlemlendiği, azometin grubuna bağlı metilen grubu taşıyan bileşiklerin FT-IR spesifik  $\nu_{(\text{CN})}$  titreşimlerinin  $1625-1640\text{ cm}^{-1}$  civarında geldiği, metilen grubu taşımayanlarda yani doğrudan aromatik halkaya bağlı olanlarda ise  $1600-1637\text{ cm}^{-1}$ 'de pik gözlemlendiği bildirilmiştir [18]. Sentezlenen Schiff bazı bileşiklerinin FT-IR spesifik  $\nu_{(\text{CN})}$  titreşimlerinin  $1600-1603\text{ cm}^{-1}$ 'de keskin pik verdiği gözlemlenmiştir. Bu veriler bileşiklerin oluşum reaksiyonunun tamamlandığını desteklemektedir ve sonuçlar literatürde verilen değerler ile uyum içerisindedir [19].

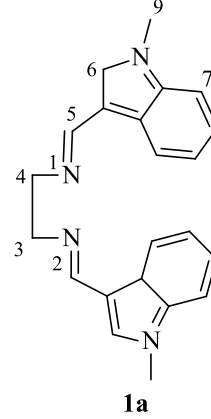
Schiff bazlarının  $^1\text{H-NMR}$  spektrumları incelendiğinde dikkat edilmesi gereken en önemli pik, bu tip bileşiklerin karakteristik piklerinden olan azometin protonuna ait olan piktir. Azometin grubuna bağlı olan proton genellikle  $\delta = 8-9$  ppm aralığında rezonans olmaktadır. Sentezlenen Schiff bazı bileşiklerinin  $^1\text{H-NMR}$  spektrumu incelendiğinde, azometin hidrojenlerine ait pikler üç bileşikte de beklenildiği gibi  $\delta = 8.16-8.46$  ppm civarında ve singlet olarak gözlemlenmiştir. İmin karbonlarına ait pikler ise  $\delta = 156.5-161.5$  ppm arasında  $^{13}\text{C}$  NMR spektrumunda görülmektedir. Bileşikler simetrik yapıya sahip olduklarından dolayı imin piki singlet olarak ortaya çıkmıştır. Elde edilen NMR sonuçlarının bileşiğin oluşumunu desteklediği ve literatürle uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir [20].

#### 1,2-Bis[1-metilindol-3-karboksilidenamino]etan, 1a:

1-Metilindol-3-karboksaldehit (1 g, 2 mmol) etil alkolde (25 mL) tamamen çözülerek içerisine etilendiamin (0.19 g, 1 mmol) eklendi. İner ortamda 4 saat kaynatıldıktan sonra alkolün yarısı vakumda uzaklaştırıldı ve dietileter eklenerek kristallendirildi. Elde edilen açık sarı kristaller süzülerek dietileterle yıkandı ve vakumda kurutuldu.

**1a** Bileşiğine ait veriler çizelgede detaylı olarak sunulmuştur (Çizelge 3.1.). FT-IR spektrumunda Schiff bazı oluşumunu destekleyen spesifik  $\nu_{(\text{CN})}$  titreşiminin  $1602\text{ cm}^{-1}$ 'de keskin bir pik verdiği gözlemlendi. Aromatik ve alifatik C-H gerilme titreşimleri  $2790-2980\text{ cm}^{-1}$ 'de zayıf pik vermiştir.  $^1\text{H-NMR}$  verileri incelendiğinde

azometin protonuna ait olan 2 protonluk pik  $\delta = 8.46$  ppm'de singlet pik verirken,  $^{13}\text{C-NMR}$ 'ında imin karbonu  $\delta = 156.5$  ppm'de sinyal verdiği görüldü. **1a** Bileşiği için elementel analiz sonuçları incelendiğinde bulunan ve hesaplanan sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlendi.



Erime Noktası:  $98-99\text{ }^\circ\text{C}$

Verim: 0.92 g; %85

$\nu_{(\text{CN})}$ :  $1602\text{ cm}^{-1}$

% Element analizi  $\text{C}_{22}\text{H}_{22}\text{N}_4$ :

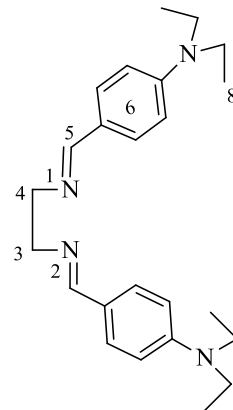
Hesaplanan: C, 77.16; H, 6.48; N, 16.36. Bulunan: C, 77.19; H, 6.51; N, 16.39.

Çizelge 3.1. **1a** Bileşiğine ait  $^1\text{H}$  ve  $^{13}\text{C-NMR}$  verileri ( $^1\text{H}$  ve  $^{13}\text{C-NMR}$  data of compound **1a**)

Konum	$^1\text{H}$ NMR ( $\delta$ ppm)	$^{13}\text{C}$ NMR ( $\delta$ ppm)	J (Hz)
3,4,9	3.79 (s, 10H)	33.2, 33.9, 62.93	-
5	8.46 (s, 2H)	156.5	-
6	7.70 (s, 2H)	123.9	-
7	7.46 ve 8.23 (d, 4H)	123.9, 125.9, 134.8, 137.9	8.0
8	7.13 ve 7.23 (t, 4H)	110.5, 113.9, 120.9, 122.9	8.0

#### 1,2-Bis[*p*-dietilaminobenzilidenamino]etan, 1b:

4-Dietilaminobenzaldehit (1 g, 2 mmol) etil alkolde (25 mL) tamamen çözülerek içerisine etilendiamin (0.17 g, 1 mmol) eklendi. İner ortamda 4 saat kaynatıldıktan sonra alkolün yarısı vakumda uzaklaştırıldı ve dietileter eklenerek kristallendirildi. Elde edilen koyu krem renkli kristaller süzülerek dietileterle yıkandı ve vakumda kurutuldu.



Erime Noktası:  $118-119\text{ }^\circ\text{C}$

Verim: 0.93g; %87

$\nu_{(\text{CN})}$ :  $1600\text{ cm}^{-1}$

% Element analizi  $\text{C}_{24}\text{H}_{34}\text{N}_4$ :

Hesaplanan: C, 76.15; H, 9.05; N, 14.80. Bulunan: C, 76.18; H, 9.07; N, 14.83.

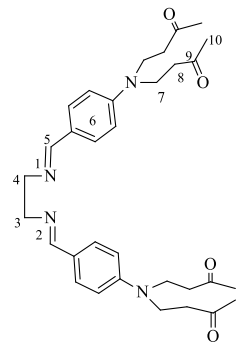
**Çizelge 3.2.** **1b** Bileşiğine ait  $^1\text{H}$  ve  $^{13}\text{C}$ -NMR verileri ( $^1\text{H}$  ve  $^{13}\text{C}$ -NMR data of compound **1b**)

Konum	$^1\text{H}$ NMR ( $\delta$ ppm)	$^{13}\text{C}$ NMR ( $\delta$ ppm)	<i>J</i> (Hz)
3,4	3.77 (s, 4H)	149.5	-
5	8.16 (s, 2H)	161.6	-
6	6.70 ve 7.53 (d, 8H)	123.7, 129.9, 111.1, 61.9	8.0
7	3.40 (q, 8H)	40.6	4.0
8	1.15 (t, 12H)	12.8	8.0

**1b** Bileşiğine ait veriler çizelgede detaylı olarak sunulmuştur (Çizelge 3.2.). FT-IR spektrumunda Schiff bazı oluşumunu destekleyen spesifik  $\nu_{\text{CN}}$  titreşiminin  $1600\text{ cm}^{-1}$ 'de keskin bir pik verirken bileşiğe ait aromatik ve alifatik C-H gerilme titreşimleri  $2820\text{-}2970\text{ cm}^{-1}$ 'de zayıf pik halinde gözlemlendi.  $^1\text{H}$ -NMR verileri incelendiğinde azometin protonuna ait olan 2 protonluk pik  $\delta = 8.16\text{ ppm}$ 'de singlet pik verirken,  $^{13}\text{C}$ -NMR'ında imin karbonu  $\delta = 161.6\text{ ppm}$ 'de sinyal verdi. **1b** Bileşiği için elemental analiz sonuçları incelendiğinde bulunan ve hesaplanan sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlendi.

### 1,2-Bis[*p*-di(oksobütül)aminobenzilidenamino]etan, **1c**:

4-[Bis[2-(asetiloksi)etil]amino]benzaldehit (1 g, 2 mmol) etil alkolde (25 mL) tamamen çözülerek içerisine etilendiamin (0.10 g, 1 mmol) eklendi. İnert ortamda 4 saat kaynatıldıktan sonra alkolün yarısı vakumda uzaklaştırıldı ve dietileter eklenerek kristallendirildi. Elde edilen sarı kristaller süzülerek dietileterle yıkandı ve vakumda kurutuldu.



Erieme Noktası:  $86\text{-}87\text{ }^\circ\text{C}$

Verim: 0.84g; %92

$\nu_{\text{CN}}$ :  $1603\text{ cm}^{-1}$

% Element analizi

$\text{C}_{32}\text{H}_{42}\text{N}_4\text{O}_4$ :

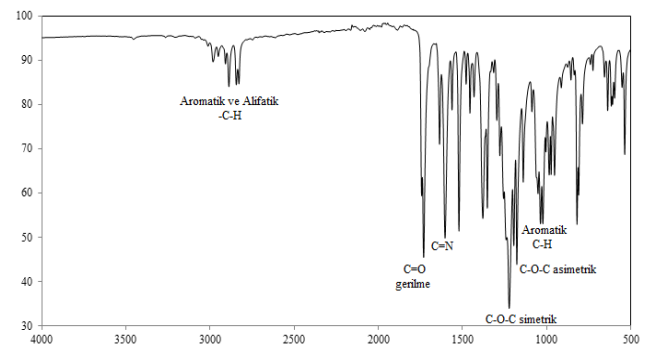
Hesaplanan: C, 70.30; H, 7.74; N, 10.25. Bulunan:

C, 70.33; H, 7.76; N, 10.22.

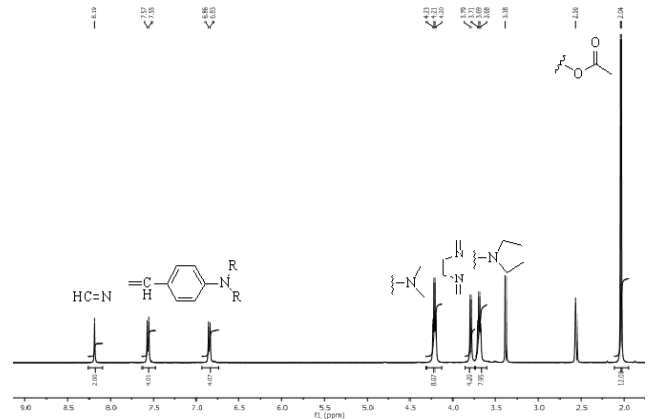
**Çizelge 3.3.** **1c** Bileşiğine ait  $^1\text{H}$  ve  $^{13}\text{C}$ -NMR verileri ( $^1\text{H}$  ve  $^{13}\text{C}$ -NMR data of compound **1c**)

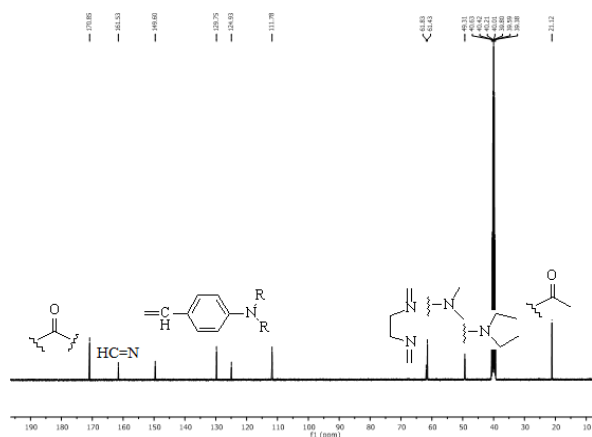
Konum	$^1\text{H}$ NMR ( $\delta$ ppm)	$^{13}\text{C}$ NMR ( $\delta$ ppm)	<i>J</i> (Hz)
3,4	3.79 (s, 4H)	61.8	-
5	8.19 (s, 2H)	161.5	-
6	6.85 ve 7.56 (d, 8H)	111.7, 124.9, 129.8, 149.6	8.0
7	4.21 (t, 8H)	61.4	4.0
8	3.69 (t, 8H)	49.3	4.0
9	-	170.8	-
10	2.04 (s, 12H)	21.1	-

**1c** Bileşiğine ait veriler çizelgede detaylı olarak sunulmuştur (Çizelge 3.3.). **1c** Bileşiğinin karakteristik IR pikleri; C=N gerilme titreşimleri, aromatik C-H ve alifatik C-H gerilme titreşimleri, C=O gerilme titreşimi ile C-O-C simetrik ve asimetrik gerilme titreşimleridir. **1c** Bileşiğinin IR spektrumunda C=O gerilme titreşimi  $1730\text{ cm}^{-1}$ 'de, azometin grubuna ait C=N gerilme titreşimi  $1603\text{ cm}^{-1}$ 'de keskin bir pik halinde görülmektedir. Aromatik C-H gerilme titreşimlerinin bir kısmı ile alifatik C-H gerilme titreşimleri  $2800\text{-}2990\text{ cm}^{-1}$ 'de zayıf pikler halinde gözlenirken, aromatik C-H gerilme titreşimlerinin diğer kısmı ise  $1033\text{ ve }1038\text{ cm}^{-1}$ 'de keskin pikler halinde geldiği görüldü. C-O-C simetrik gerilme titreşimi  $1221\text{ cm}^{-1}$ 'de, C-O-C asimetrik gerilme titreşimi  $1175\text{ cm}^{-1}$ 'de keskin pik halinde gözlemlendi. Bu bantlar **1c** bileşiğinin oluşum reaksiyonunun tamamlandığını desteklemektedir (Şekil 4).

**Şekil 4.** **1c** Bileşiğinin FT-IR spektrumu

$^1\text{H}$ -NMR verileri incelendiğinde azometin protonuna ait olan 2 protonluk pik  $\delta = 8.19\text{ ppm}$ 'de singlet pik verirken  $^{13}\text{C}$ -NMR'ında imin karbonu  $\delta = 161.5\text{ ppm}$ 'de sinyal verdi (Şekil 5 ve Şekil 6). **1c** Bileşiği için elemental analiz sonuçları incelendiğinde bulunan ve hesaplanan sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlendi.

**Şekil 5.** **1c** Bileşiğinin DMSO içinde  $27\text{ }^\circ\text{C}$  ve 400 MHz'de  $^1\text{H}$ -NMR spektrumu



Şekil 6. 1c Bileşiğinin DMSO içinde 27 °C ve 400 MHz'de <sup>13</sup>C-NMR spektrumu

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada azot içeren aromatik aldehytlere etilendiamin ile etkileştirilmesiyle üç yeni Schiff bazı bileşiği sentezlendi. Hazırlanan bileşikler yüksek verimlerle elde edildi. Sentezlenen bileşiklerin analiz sonuçları literatürle karşılaştırıldığında FT-IR, <sup>1</sup>H-<sup>13</sup>C NMR verilerinin literatürle uyum içerisinde olduğu belirlendi. Schiff bazı bileşikleri ve metal komplekslerinin yaygın uygulama alanları mevcuttur. Sentezlenen bileşikler katalitik ve biyolojik özelliklere sahip, suda çözünebilir metal komplekslerinin hazırlanması potansiyeline sahip önemli bileşiklerdir. Bu özelliklerinden faydalanılarak yeşil kimyaya uygun çalışmalarda kullanılması mümkündür. Elde edilen bileşiklerin sonraki çalışmalarda uygun metaller ile kompleksleştirilerek katalitik özellikleri ve antimikrobiyal aktivitelerinin incelenmesi planlanmaktadır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Schiff H., "Untersuchungen Über Salicin Derivate", *Eur. J. Org. Chem.*, 150; 193-200, (1869).
- [2] Sharaby C. M., Amine M. F., Hamed A. A., "Synthesis, structure characterization and biological activity of selected metal complexes of sulfonamide Schiff base as a primary ligand and some mixed ligand complexes with glycine as a secondary ligand", *J. Mol. Struct.*, 1134: 208-216, (2017).
- [3] Redshaw C., "Use of Metal Catalysts Bearing Schiff Base Macrocycles for the Ring Opening Polymerization (ROP) of Cyclic Esters", *Catalysts*, 7(5): 165-176, (2017).
- [4] Roberts D. W., Schultz T. W., Api A. M., "Skin Sensitization QMM for HRIPT NOEL Data: Aldehyde Schiff-Base Domain", *Chem. Res. Toxicol.*, 30(6): 1309-1316, (2017).
- [5] DiRisio R. J., Armstrong J. E., Frank M. A., Lake W. R., McNamara W. R., "Cobalt Schiff-base complexes for electrocatalytic hydrogen generation", *Dalton Trans.*, 46: 10418-10425, (2017).
- [6] Upadhyay K. K., Kumar A., Upadhyay S., Mishra P. C., "Synthesis, characterization, structural optimization using density functional theory and superoxide ion scavenging activity of some Schiff bases", *J. Mol. Struct.*, 873: 5-16, (2008).
- [7] Pfeiffer P., Breith E., Lubbe E., Tsumaki T. "Tricyclische Orthokondensierte Nebenvolenzringe", *Annalen Der Chemie*, 503: 84-127, (1933).
- [8] Seçkin T., Köytepe S., Demir S., Özdemir İ., Çetinkaya B., "Novel type of metal-containing polyimides for the heck and Suzuki-Miyaura cross-coupling reactions as highly active catalysts", *J. Inorg. Organomet P.*, 13(4): 223-235, (2003).
- [9] Ashraf M., Wajid A., Mahmood K., Maah M., Yusoff I. "Spectral Investigation of the Activities of Amino Substituted Bases", *Orient. J. Chem.*, 27: 363-372, (2011).
- [10] Ozaslan M., Karagöz I. D., Kılıç I. H., Güldür M. E., "Ehrlich ascites carcinoma", *Afr. J. Biotechnol.*, 10: 2375-2378, (2011).
- [11] Golcu A., Tümer M., Demirelli H., Wheatley R., "Cd(II) and Cu(II) complexes of polydentate Schiff base ligands: synthesis, characterization, properties and biological activity", *Inorg. Chim. Acta*, 358: 1785-1797, (2005).
- [12] Silva da C., Silva da D., Modolo L., Alves R., "Schiff bases: A short review of their antimicrobial activities", *J. Ad. Res.*, 2: 1-8, (2011).
- [13] Rehman W., Baloch M. K., Muhammad B., Badshah A., Khan K. M., "Characteristic spectral studies and in vitro antifungal activity of some Schiff bases and their organotin (IV) complexes", *Chin. Sci. Bull.*, 49: 119-122, (2004).
- [14] Emregül K. C., Düzgün E., Atakol O., "The application of some polydentate Schiff base compounds containing aminic nitrogens as corrosion inhibitors for mild steel in acidic media", *Corr. Sci.*, 48: 3243-3260, (2006).
- [15] Aydınlı Esen A., "Bazı Schiff Bazılarının Antimikrobiyal Etkileri", *Yüksek Lisans*, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2006).
- [16] Serin, S., Gök, Y., "Hidroksi Schiff Bazı Metal Komplekslerinin Tekstil Boyamacılığında Kullanılabilirliğinin İncelenmesi", *T. Kimya D.C.*, 12: 325-331, (1988).
- [17] Özbülül A., "Oligofenol Esaslı Yeni Tip Oligomer Schiff Bazılarının Sentezi ve Karakterizasyonu", *Yüksek Lisans*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2006).
- [18] Karahan A., Yardan A., Yahsi Y., Kara H., Kurtaran R., "N<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Tipi Schiff Bazı Ligandı ile Sentezlenen Cu(II) Kompleksinin X-Işını Yapısı ve Termal Özelliği", *SDU Journal of Science (E-Journal)*, 8 (2): 163-174, (2013).
- [19] Amer S. A., Gaber M., Issa R. M., "Synthesis and Properties of the Binuclear Vanadium(III) and Oxovanadium(IV) Chelates with Tetradentate Schiff Bases", *Polyhedron*, 7 (24): 2635-2640, (1988).
- [20] Nelson S. M., Knox C. V., McCann M., Drew, M. G. B., "Metal-Ion-Controlled Transamination in the Synthesis of Macrocyclic Schiff Base Ligands. Part 1. Reaction of 2,6-Diacetylpiperidine and Dicarboxylic-Compounds with 3,6-Dioxaoctane-1,8-Diamine", *J. Chem. Soc., Dalton Trans.*, 8: 1669-1677, (1981).





POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

## AISI D2 ve AISI D3 soğuk iş takım çeliklerinin delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisinin incelenmesi

*Investigation the effects of cutting parameters on the cutting forces in drilling AISI D2 and AISI D3 cold work tool steels*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Hasan Basri ULAŞ

*ORCID:* 0000-0002-9754-6055

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article):** Ulaş H. B., “AISI D2 ve AISI D3 soğuk iş takım çeliklerinin delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 251-256, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.412662

# AISI D2 VE AISI D3 Soğuk İş Takım Çeliklerinin Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Hasan Basri ULAŞ**

Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.11.2016 ; Kabul/Accepted : 26.08.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada, AISI D2 ve AISI D3 soğuk iş takım çelikleri, kaplamasız HSS ve karbür matkaplarla delinmiştir. Deneyler, 15, 20, 25 ve 30 m/dak kesme hızları ve 0,06; 0,08; 0,1 ve 0,12 mm/dev ilerleme değerleri kullanılarak CNC dik işlem merkezinde, kuru kesme şartlarında yapılmıştır. Delik delme işlemleri esnasında maksimum kesme kuvvetleri (Fz) ve maksimum momentler (Mz) ölçülmüştür. Kesme hızı, ilerleme, matkap malzemesi ve iş parçası malzemesinin maksimum kesme kuvvetleri ve maksimum momentler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Artan ilerleme ile birlikte her iki iş parçası malzemesinin delinmesinde de kesme kuvvetleri genellikle artmıştır. Kesme hızının maksimum kesme kuvveti üzerinde çok belirgin bir etkisi görülmemiştir. AISI D3 çeliğinin delinmesinde oluşan kuvvetlerin, AISI D2 çeliğine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, HSS matkaplarla oluşan kuvvetlerin de karbür matkaplara kıyasla daha yüksek olduğu da ortaya çıkmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** AISI D2, AISI D3, delik delme, kesme kuvveti.

## Investigation The Effects of Cutting Parameters on the Cutting Forces in Drilling AISI D2 and AISI D3 Cold Work Tool Steels

### ABSTRACT

In this study, AISI D2 and AISI D3 cold work tool steels were drilled by using uncoated HSS and carbide drill bits. The drilling tests were performed on a CNC vertical machining centre at 15, 20, 25 and 30 m/min cutting speeds and 0.06, 0.08, 0.1 and 0.12 mm/rev feed rate without coolant. Maximum cutting force (Fz) and maximum torque values were measured during the drilling process. The effects of cutting speed, feed rate, and drill and workpiece material on the maximum cutting force and torque were investigated. Increasing the feed rate generally lifted the maximum cutting forces up for the test parts. However, the cutting speed did not have a clear effect on the maximum cutting forces. In drilling of AISI D3 cold work tool steel, higher forces were obtained than those obtained in drilling of AISI D2 cold work tool steel. In addition, carbide drill bits led to the lower forces than did HSS drill bits.

**Keywords:** AISI D2, AISI D3, drilling, cutting force

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte endüstriyel alanda takım çeliklerinin kullanımı hızla artmaktadır. İçerdikleri alaşım elementleri ve maruz kaldıkları ısı işlemler sonucu takım çelikleri yüksek mukavemet, iyi aşınma direnci ve iyi ısıl kararlılık gibi üstün özellikler sergilemektedirler. Ayrıca korozyona karşı direnci de sağlık sektörü için bu malzemeyi önemli hale getirmiştir. Çok çeşitli özelliklere sahip bu malzemenin işleme sürecindeki davranışları üzerine pek çok çalışma yapılmış olup halen bu konudaki çalışmalar da devam etmektedir.

Soğuk iş takım çelikleri imalat ve takım sektörü gibi alanlarda giderek artan kullanımına bağlı olarak bu alaşımların işlenebilirliği önemli bir araştırma konusu olmuştur. Soğuk iş takım çeliklerinin işlenmesi sırasında gösterdiği davranışlar diğer malzemelere göre daha farklıdır. Bu malzemelerin yüksek dayanımı, talaş kaldırma sırasında kesici takımın üzerine yaptığı etki kesmenin optimum bir şekilde gerçekleşmesini engellenmektedir.

Makina imalat endüstrisi denilince akla ilk gelen; iş parçası, kesici takım ve takım tezgâhidir. İmalat sanayinde alaşımlı çelik ve dökme demirden yapılan makina ve teçhizatlar veya ürünler torna, freze, matkap, taşlama gibi takım tezgâhları kullanılarak nihai geometrilerine getirilirler. Takım tezgâhına bağlanan iş

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author)  
e-posta : bulas@gazi.edu.tr

parasının kesici takımlar aracılığı ile istenilen geometri, ölçü ve yüzey kalitesine getirilme işlemi talaş kaldırma işlemi olarak adlandırılır. Talaş kaldırma işlemleri imalat endüstrisinde kullanılan temel imalat işlemlerinin bir grubudur. Özellikle işleme maliyetini azaltmak ve ürün kalitesini iyileştirme isteği talaş kaldırma alanında araştırmaların yapılmasını da zorunlu kılmaktadır [1,2].

İşlenen iş parçasının istenilen toleranslar dâhilinde üretilebilmesi sadece kullanılan kesici, iş parçası malzemesine bağlı değildir. Takım tezgâhının uzun ömürlü olabilmesi, tezgah hassasiyetinin uzun süre korunabilmesi için işlenen parçaya ve tezgahlara etki eden yüklerine etkisiyle meydana gelen gerilmelerin belirlenmesi gerekir. Çeşitli nedenlerle teorik olarak belirlenen gerilme değerleri ile uygulamalı olarak elde edilen değerler örtüşmemektedir. Bu nedenle kuvvetlerin deneysel olarak analizi ve ölçülmesi gerekir [3,4]. Dolayısı ile emniyetli bir çalışma ortamının gerçekleştirilmesi, üretilecek ürün ve sistemin uzun ömürlü, kaliteli ve ekonomik olabilmesi için kesici takım ve takım tezgahlarını etkileyen bütün kuvvetlerin doğru ve hassas olarak ölçülmesi gerekmektedir. Bütün parça ve sistemlerin dayanım hesaplarının teorik olarak yapılması her zaman kolay olmayabilir. Hesaba katılmayan ve belirlenmeyen faktörler ileride olumsuz sonuçlar doğurabilir [3].

Seramik takımlarla AISI D2 çeliğinin tormalanmasında, kesme hızının yükselmesiyle birlikte aşırı derecede yanak aşınmasının oluştuğunu tespit edilmiştir [4, 5]. AISI D2, AISI H11, 35NiCrMo16 ve AISI 52100 çeliklerini CBN kesici takımlarla işlemiş ve takım aşınmasına en etkili faktörün iş parçalarının mikro yapılarında bulunan karbür oluşumlarının olduğunu tespit edilmiştir. [6]. AISI 1040 çeliğinin tormalanması esnasında, kesme hızının, ilerleme miktarının, kesme derinliğinin artışıyla sıcaklık değerlerinin artış gösterdiği gözlemlenmiştir [7]. Bir başka çalışmada AISI 316Ti malzemesinin tormalanmasında, kesici uç yarıçapının kesici aşınmasında etkili olduğu belirlenmiştir. Büyük kesici uç yarıçaplı kesicinin aşınma dayanımının daha yüksek olmasını, kesici-talaş ara yüzeyinde meydana gelen yüksek sıcaklığın daha geniş yüzeye yayabilmesinden kaynaklandığına dayandırmışlardır [8].

Makine imalat alanında kullanılan temel talaşlı imalat işlemlerinde delik delme operasyonları, %20-30'a yakın bir yer kaplamaktadır [8-9]. Bu da aslında, delik delme malzemelerin talaş kaldırarak şekillendirilmesinde önemli bir yere sahip olduğunu göstermektedir. Fakat önceleri delik delme çalışmalarına gerekli önem verilmemiştir. Son yıllarda delik delme çalışmaları artmaya başlamıştır. Yapılan çalışmalarda ise, delik delme sürecinde işleme performansına etki eden faktörlerden kesici takım türü ve uç geometrisi, iş parçası malzemesi, delik çapı, tezgah rijitliği, soğutma sıvısı, kesme hızı ve ilerleme gibi kesme parametreleri ile ilgili çeşitli deneyler yapılmıştır. Delinen malzemenin tanecik yapısı ve sertliğinin kesme olayına etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

SAE 308 ve 390 malzemelerinin delinmesinde, ilerleme miktarının artmasıyla talaşın kalınlaştığını, soğutma sıvısı kullanıldığında talaşın daha kıvrımlı olduğunu, ilerleme kuvvetinin ilerleme miktarının artışıyla arttığını tespit ederek, ilerleme kuvveti ve momentin matkap malzemesi ve uç açısıyla değiştiğini belirtmişlerdir [8-10]. İlerleme miktarı artışına karşın sıcaklığın azalmasını daha hızlı talaş tahliyesi ve matkap-talaş temas süresinin daha kısa olmasına yorumlamışlardır [11, 12]. Kaplamalı ve kaplamasız farklı uç açılı helisel matkaplarla, Al 2024-T4 iş parçasına kuru kesme şartlarında delmiş ve en yüksek sıcaklık değerini 118° uç açılı kaplamasız matkapla, en az sıcaklık değerini ise 130° uç açılı kaplamalı matkapla yapılan işlemlerde elde etmiştir [13-16].

Yapılan literatür araştırmalarında, malzemeler üzerinden talaş kaldırılmasına (işlenebilirlik) yönelik birçok çalışmanın yapıldığı ve halen yapılmakta olduğu gözlenmiştir. Özellikle de, malzemelerin tormalanması ve frezelemesi yönünde çalışmalar oldukça fazladır. Delik delme yönünde ise çalışmalar az ve yenidir. Bunlarla birlikte, soğuk takım çelikleri olarak adlandırılan AISI D3 ve D2 malzemelerine yönelik delik delme çalışmalarının oldukça kısıtlı olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, imalat sanayisinde yaygın kullanıma sahip olan AISI D3 ve AISI D2 malzemelerinin delinmesine yönelik bir çalışma amaçlanmıştır. Deneyler için, imalat sanayisinde yaygın kullanıma sahip kaplamasız HSS ve karbür matkapları tercih edilmiştir. Deneylerde, iş parçası malzemesi ve kesme parametrelerinin, kesme kuvvetleri ve moment üzerindeki etkileri incelenmiştir. Böyle bir çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı düşünülmüştür.

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

Çalışmada 2 farklı soğuk iş takım çeliği malzeme (AISI D2 ve AISI D3) kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan iş parçası malzemelerinin kimyasal bileşimleri Tablo 1'de ve mekanik özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir. Malzemeler, Ø8 mm çapında kaplamasız HSS ve karbür matkaplar kullanılarak kuru kesme şartlarında delinmiştir. Kullanılan her iki matkap ta 118° uç açısına sahip olup kaplamasızdır. Matkaplar, CNC dik işlem merkezine bir pens yardımıyla rijit bir şekilde bağlanmıştır. Delikler, boydan boya delik delme yöntemi (devam eden ilerleme hareketi ile delik delme) kullanılarak açılmıştır. Kesme parametrelerinin belirlenmesinde yapılan çalışmalar ve takım üretici firmaların önerileri dikkate alınmıştır. Deneylerde kullanılan tüm kesme şartları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3’de verilen şartlara göre: 2 Malzeme, 2 Kesici takım, 4 ilerleme ve 4 Kesme hızı için toplamda 64 adet deney yapılması gerekmektedir.

statoru (Kistler 5221B1), çok kanallı bir sinyal şartlandırıcısı (Kistler 5223B2) ve bağlantı kabloları ile 8 kanallı bir A/D kartını (Kistler 2855A4) da

**Çizelge 1.** AISI D2 ve AISI D3 soğuk iş takım çeliği malzemelerin kimyasal bileşimleri (Chemical composition of AISI D2 and AISI D3 cold work tool steel Materials)

AISI/TSE	DIN	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	V
D2/Ç2379	X 155 CrVMo121	1,55				12,00	0,70	1,00
D3/Ç2380	X210 Cr 12	2,10	0,30	0,30	0,01	11,00		

**Çizelge 2.** AISI D2 ve AISI D3 malzemelerin mekanik özellikleri (Mechanical properties of AISI D2 and AISI D3 materials)

AISI D2/Ç2379		AISI D3/Ç2380	
Yoğunluk	7.7 x 1000 kg/m <sup>3</sup>	Yoğunluk	7.7 x 1000 kg/m <sup>3</sup>
Erime noktası	1421°C	Erime noktası	1421°C
% uzama (Poisson oranı)	0.27-0.30	% uzama (Poisson oranı)	0.27-0.30
Termal uzama (20-100°C)	10.4 x 10 <sup>-6</sup> /°C	Termal uzama (20-100°C)	12 x 10 <sup>-6</sup> /°C
Sertleştirme sertlik (HRc)	59	Sertleştirme sertlik (HRc)	61

**Çizelge 3.** Delme deneylerinde kullanılan kesme parametreleri (Cutting parameters used in drilling experimental)

İş Parçası Malzemesi AISI/TSE	Kesici Takım	İlerleme (f: mm/dev)	Kesme Hızı (V:m/dak)
AISI D2/Ç2379	Ø 8 mm HSS Matkap	0,06 mm/dev	15 m/dk
AISI D3/Ç2380	Ø 8 mm Karbür Matkap	0,08 mm/dev	20 m/dk
		0,1 mm/dev	25 m/dk
		0,12 mm/dev	30 m/dk

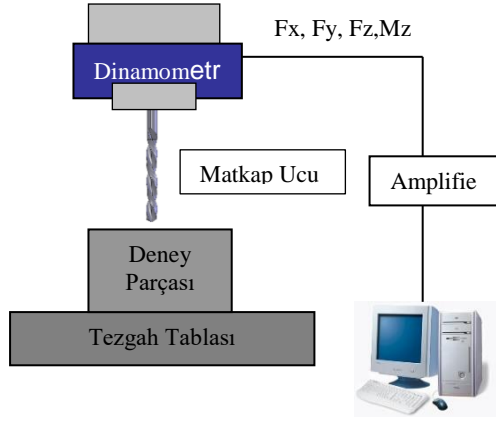
Çalışmada 2 farklı soğuk iş takım çeliği malzeme (AISI D2 ve AISI D3) kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan iş parçası malzemelerinin kimyasal bileşimleri Çizelge 1’de ve mekanik özellikleri ise Çizelge 2’de verilmiştir. Malzemeler, Ø8 mm çapında kaplamasız HSS ve karbür matkaplar kullanılarak kuru kesme şartlarında delinmiştir. Kullanılan her iki matkap ta 118° uç açısına sahip olup kaplamasızdır. Matkaplar, CNC dik işlem merkezine bir pens yardımıyla rijit bir şekilde bağlanmıştır. Delikler, boydan boya delik delme yöntemi (devam eden ilerleme hareketi ile delik delme) kullanılarak açılmıştır. Kesme parametrelerinin belirlenmesinde yapılan çalışmalar ve takım üretici firmaların önerileri dikkate alınmıştır. Deneylerde kullanılan tüm kesme şartları Çizelge 3’te verilmiştir. Çizelge 3’de verilen şartlara göre: 2 Malzeme, 2 Kesici takım, 4 ilerleme ve 4 Kesme hızı için toplamda 64 adet deney yapılması gerekmektedir.

Kesme kuvvetleri dört bileşenli piezoelektrik esaslı bir Kistler 9123C dönen tip kuvvet/moment ( $F_x, F_y, F_z, M_z$ ) dinamometresi vasıtasıyla ölçülmüştür. Kesme kuvveti ölçüm sistemi, aynı zamanda bir bağlama aparatı yardımıyla dik işleme merkezine monte edilebilen bir

ölçmektedir. Kesme kuvveti sistemi ile ölçülen veriler, DynoWare (Type 2825D-02) bilgisayar programı yardımıyla işleme tabi tutulmuştur. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneğinin CNC tezgahı üzerindeki montajı Şekil 1’de gösterilmektedir. Deney düzeneği şematik olarak ta Şekil 2’de verilmiştir. Delme deneyleri için bir CNC Johnford VMC 550 dik işlem merkezi kullanılmıştır.



**Şekil 1.** CNC tezgahı ve deney düzeneği (CNC machine and Experiment setup)

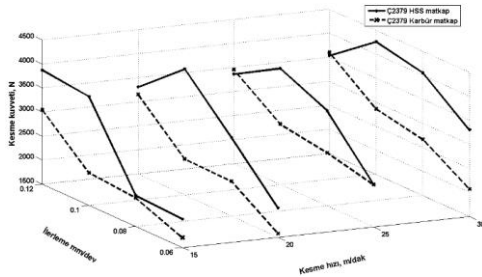


Şekil 2. Deney düzeneğinin şematik gösterilişi (Schematic representation of the experiment setup)

### 3. BULGULAR ve SONUÇ ( FINDINGS AND RESULTS)

Şekil 3'te AISI D2 (2379) soğuk iş takım çeliğinin karbür ve HSS matkaplarla delinmesi esnasında matkaba etki eden en yüksek kesme kuvvetlerinin ( $F_{max}$ ) kesme hızı ve ilerleme ile değişimleri verilmiştir. Kesme kuvvetleri delik delme işlemlerinde oluşan ısı, delik kalitesi ve matkap aşınması üzerinde etkilidir. Özellikle yüksek kesme kuvvetleri sonucu oluşan yüksek sıcaklık matkap aşınmasını hızlandırır ve delinen parça kalitesini olumsuz etkiler. Ayrıca, yüksek kesme kuvvetleri delinen deliklerin dairesellikten sapma (ovalite) değerlerini artırır ve delik alt yüzeyinde oluşan çapak büyüklüğünü de artırır [14].

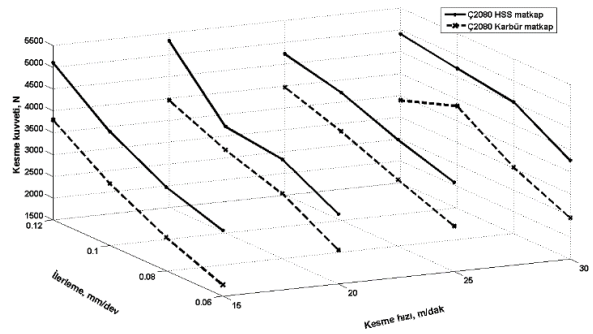
Şekil 3'ten ilerleme değerinin artması ile genel olarak kesme kuvvetinin her iki matkap için de arttığı görülmektedir. Talaşlı imalat işlemlerinde artan ilerleme değeri ile kesme kuvvetlerinin artması beklenen bir durumdur [15]. Artan ilerleme ile birlikte deforme olmamış talaş kesiti artar bu durum da kesme kuvvetlerinin artmasına neden olur. HSS matkaplarla delme işlemlerinde 0,08 mm/dev ilerleme değerine kadar ilerlemenin artması ile kuvvetler artarken bu değerden sonra ilerleme değerindeki artışla kuvvetlerin düştüğü görülmektedir. Bu durum için, f: 1,2 mm/dev ilerleme hızı ile delik içindeki talaşın daha hızlı dışarı atıldığı, dolayısı ile kesici üzerinde talaş yapışmasının daha az meydana geldiği yorumu yapılabilir [16]. Artan ilerleme değeriyle kesme kuvvetlerinin düşmesi talaşlı imalat işlemlerinde nadiren görülen bir durumdur.



Şekil 3. AISI D2 takım çeliğinin delinmesinde oluşan en yüksek kesme kuvvetleri ( $F_{max}$ ) (AISI The highest cutting forces ( $F_{max}$ ) formed in the drilling of the D2 tool steel)

Şekil 3'ten kesme hızının değişimi ile kesme kuvvetlerinin bir miktar değiştiği görülmektedir. Karbür matkaplarla delme işleminde oluşan kesme kuvvetlerinin HSS matkaplarla delme işleminde oluşanlara göre daha düşük olduğu görülmektedir. Karbür matkaplarla oluşan aşınma dirençlerinden dolayı matkabin kesici uçlarının HSS takımlara göre daha uzun süre keskinliklerini korumalarıyla açıklanabilir. Ayrıca, karbür matkaplara iş parçası yapışma eğiliminin daha az olmasıyla da açıklanabilir [17]. Bilindiği gibi karbür takımlar, HSS'ye oranla ısı kararlılığı daha yüksek olup talaşlı imalat işlemleri esnasında daha az yapışma eğilimi gösterir [18]. Dolayısıyla, bu daha az yapışma eğiliminden dolayı daha düşük kesme kuvvetleri oluşur.

Şekil 4 AISI D3 soğuk iş takım çeliğinin delinmesi esnasında oluşan en yüksek kesme kuvvetlerini göstermektedir. Bu malzemenin delinmesinde artan ilerleme değeriyle kesme kuvvetlerinin çoğunlukla arttığı görülmektedir. Matkap malzemesinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi AISI D2 malzemeye göre daha açık bir şekilde görülmektedir. Kesme kuvvetindeki artış, AISI D3 kimyasal bileşiminin kazandırdığı mekanik özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir [18]. AISI D3 malzemenin delinmesinde HSS matkapla elde edilen kesme kuvvetlerinin karbür matkapla elde edilenlere göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

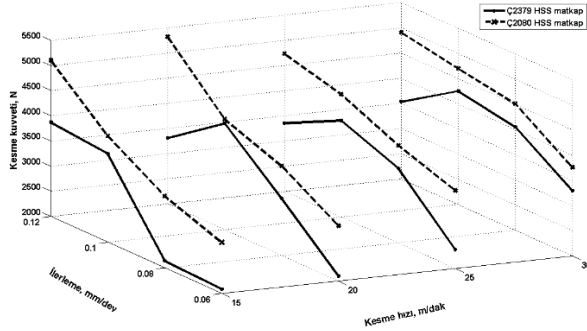


Şekil 4. AISI D3 takım çeliğinin delinmesinde oluşan en yüksek kesme kuvvetleri ( $F_{max}$ ) (The highest cutting forces ( $F_{max}$ ) formed in the drilling of AISI D3 tool steel)

Şekil 3 ve Şekil 4'e bakıldığında her iki iş parçası malzemesi ve her iki matkap çeşidi için de ilerlemenin artmasıyla kesme kuvvetinin arttığı açık bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte HSS matkapların Karbür matkaplara göre daha büyük kesme kuvveti oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca kesme hızının değişiminin kesme kuvveti üzerinde belirgin bir etkisi olmadığıda görülmektedir.

AISI D2 ve AISI D3 soğuk iş takım çeliklerinin HSS matkap ile delinmesi sonucu ölçülen kuvvetler karşılaştırmalı olarak Şekil 5'te gösterilmiştir. AISI D3 soğuk iş takım çeliğinin sertliği, akma dayanımı ve çekme dayanımının AISI D2 soğuk iş takım çeliğinkinden daha fazla olduğu bilinmektedir [19]. Şekil 3'te AISI D2 için ölçülen en düşük kuvvet yaklaşık

4250 N olarak görülürken Şekil 4'te AISI D3 için ölçülen en yüksek kuvvetin yaklaşık 5400 N civarında olduğu görülmektedir. AISI D3 malzemedeki bu yüksek kuvvetler bu malzemenin yüksek akma ve çekme dayanımları ile açıklanabilir. Ayrıca, bu malzemenin sertliğinin daha yüksek olması da hızlı takım aşınmasına neden olacağı için kuvvetlerin yüksek çıkmasında yüksek sertliğin de katkısı olabilir [18-20].



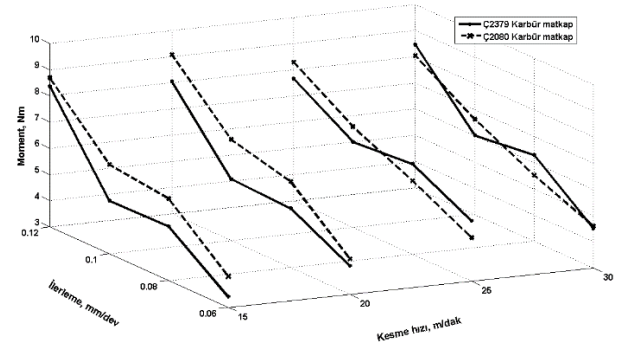
**Şekil 5.** HSS matkaplarla elde edilen kesme kuvvetlerinin iş parçası malzemesine göre değişimi (Change of cutting forces obtained by HSS drills according to workpiece material)

Şekil 5'ten ayrıca AISI D3 malzemenin delinmesinde ölçülen kesme kuvvetlerinin kesme hızı ve ilerlemeye göre daha düzenli bir eğilim gösterdiği görülmektedir. Artan ilerleme ile kesme kuvvetleri artmaktadır. Bu durum talaşlı imalat işlemlerinde beklenen bir durumdur. Ancak, AISI D2 malzemedeki özellikle en yüksek ilerleme değerinde bir önceki ilerleme değeri ile karşılaştırıldığında kesme kuvvetlerinde düşüşler görülmektedir. Bu durum AISI D2 malzemenin düşük sertliği ve dolayısıyla yüksek sünekliliği ile açıklanabilir [18-20]. Yüksek sünekliliğin talaşlı imalat işlemleri esnasında yığıntı talaş (BUE) oluşumu ve işlem esnasında bu yığıntı talaşın kopmasıyla kesme kuvvetlerinde düzensizliğe neden olması muhtemeldir. Dolayısıyla, AISI D2 malzemenin delinmesinde, yüksek ilerlemede kesme kuvvetlerinde gözlemlenen düşüş bu şekilde açıklanabilir.

Özellikle delik delme işlemlerinde matkabın burulmasına veya çok fazla olması durumunda da kırılmasına yol açabilecek bir başka etken ise döndürme momentidir. Matkapların helisel kanalları, burulma gerilmelerine karşı matkapları daha hassas yapar. Dolayısıyla, sağlıklı bir delme işlemi yapabilmek için momentlerin matkapların direnç gösterebileceği değerlerden düşük olması gerekir [15,16].

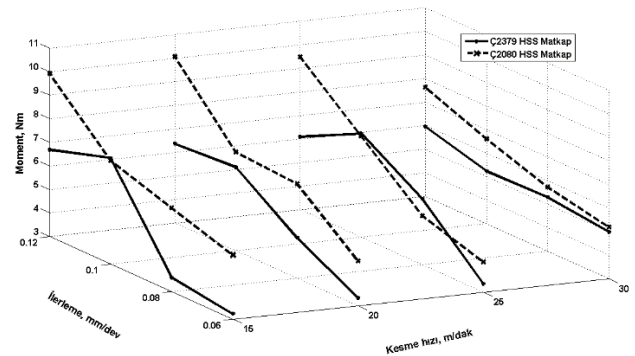
AISI D2 ve AISI D3 malzemedeki karbür matkap kullanılarak yapılan deneylerde dört farklı kesme hızı ve dört farklı ilerleme için elde edilen moment değerleri Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'dan görüldüğü gibi artan ilerleme moment değerlerinin arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, her iki malzemenin karbür matkapla delinmesinde elde edilen moment değerlerinin birbiri yakın olduğu görülmektedir. Dolayısı ile elde edilen

grafik, momentin malzeme tipinden çok fazla etkilenmediğini ortaya koymaktadır.



**Şekil 6.** AISI D2 ve AISI D3 iş parçasının karbür matkaplarla delinmesinde elde edilen moment değerleri (Moment values obtained by drilling AISI D2 and AISI D3 workpieces with carbide drills)

Şekil 7. de AISI D2 ve AISI D3 çeliklerin HSS matkapları ile delinmesinde elde edilen moment grafiği verilmiştir. Genel itibarı ile AISI D3 malzemesi için elde edilen moment değerleri, AISI D2'ye kıyasla daha yüksek elde edilmiştir. Fakat ilerleme artışı karşısında moment kararlı bir şekilde artış göstermiştir. AISI D3 malzemesinin HSS matkaplarla delinmesinde ani moment dalgalanmalarının yaşanmayacağı ortaya çıkmaktadır. Artan kesme hızı ile AISI D3 malzemesinin delinmesinde moment azalma eğilimine girmiştir. Fakat AISI D2 malzemesinin HSS matkapları ile delinmesinde genel itibarı ile en düşük moment değerleri elde edilmesine karşın artan ilerleme ile kararlı bir artış söz konusu değildir. AISI D2 malzemesinin delinmesinde meydana gelen kesici yapışmaları ve olası BUE problemlerinin momentleri etkilediği anlaşılmaktadır.



**Şekil 7.** AISI D2 ve AISI D3 malzemesini HSS matkapları delinmesinde elde edilen moment grafikleri (AISİ D2 and AISİ D3 material moment graphs obtained at the drilling of HSS drills)

## 6. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Endüstride yaygın olarak kullanılan AISI D2 ve AISI D3 soğuk iş takım çeliklerine HSS ve karbür matkaplarla farklı işlem koşullarında delik delme işlemleri gerçekleştirilen bu çalışmada kesme kuvvetleri ve momentler ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar:

1. Artan ilerleme ile birlikte AISI D3 soğuk iş takım çeliği malzemede kesme kuvvetleri artmıştır. AISI D2 soğuk iş takım çeliği malzemede de benzer bir eğilim görülmekle birlikte bazen ilerleme değerinin artmasıyla kesme kuvvetlerinde düşüşler görülmüştür.
2. AISI D2 malzemede kesme kuvvetlerindeki bu beklenmedik düşüşler bu malzemenin AISI D3 malzemeye göre daha yüksek olan sünekliği ile açıklanmıştır.
3. Karbür matkapla delme işlemi esnasında oluşan kuvvetlerin HSS matkapla delme işlemi esnasında oluşanlara göre daha düşük olduğu görülmüştür.
4. Karbür matkapla elde edilen düşük kuvvetler karbür matkaplara daha düşük iş parçası yapışma eğilimine ve karbür matkapların daha yüksek aşınma direncine dayandırılmıştır.
5. AISI D2 malzemenin delinmesinde oluşan kuvvetlerin AISI D3 malzemenin delinmesinde oluşan kuvvetlerden daha düşük olduğu görülmüştür.
6. HSS matkaplarla yapılan deneylerde en yüksek moment, AISI D3 malzemesinin delinmesinde elde edilmiştir. Elde edilen moment, artan ilerleme ile karalı bir artış göstermiştir. Artan kesme hızı ile de düşüş eğilimine girmiştir.
7. AISI D2 malzemesinin HSS matkapları ile delinmesinde en düşük moment değerlerinin elde edilmesinin yanında moment artışlarının kararlı olmadığı belirlenmiştir. Bu durum, AISI D2 malzemesinin delinmesinde ortaya çıkan talaş yapışmaları ve BUE ile açıklanmıştır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

2007-29 numaralı projeye vermiş oldukları destekten dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Şahin, Y., "Kesici Takım Geometrisi ve Seçimi", *Talaş Kaldırma Prensipleri*, Cilt 1 Ankara, (2000).
- [2] Trent, E.M., "Metal Cutting" 2<sup>nd</sup> Edition, Butterworth-Heinemann, (1991).
- [3] Şeker, U., "Talaşlı İmalatta Takım Tasarımı", *G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Ders Notları*, Ankara, 2000.
- [4] Süzgül M. Ve Kayır Y., "DIN 1.2311 ve DIN 1.2738 Kalıp çeliklerinin İşlenebilirliği" 3. *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, 4-5 Ekim, Ankara., (2012).
- [5] Korkut, İ., Dönertaş, M.A., Şeker, U., "Üç Boyutlu Dinamometre Tasarımı ve İmalatı", *Z.K.Ü. Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Teknoloji Dergisi*, 2(1-2): 115-116, Karabük.

- [6] Davim, J. P., Figueira, L., "Machinability Evaluation in Hard Turning of Cold Work Tools Teel (D2) With Ceramic Tools Using Statistical Techniques", *Materials and Design*, 28: 1186-1191, (2007).
- [7] Poulachon, G., Bandyopadhyay, B.P., Jawahir, I.S., Pheulpin, S., Seguin, E., "Wear Behavior of CBN Tools While Turning Various Hardened Steels", *Wear*, 256: 302-310, (2004).
- [8] Kayır Y., Arslan S. Ve Aytürk A., "AISI 316Ti Paslanmaz Çeliğin Tornalanmasında Kesici Uç etkisinin Taguchi İle Analizi", *Gazi Ü. MMF Dergisi* 28: 363-372, (2013).
- [9] Silva, M. B., Wallbank, J., "Cutting Temperature: Prediction and Measurement Methods-a Review" *Journal of Materials Processing Technology*, 88: 195-202, (1999).
- [10] Haan, D. M., Batzer, S. A., Olson, W. W., Sutherland, J. W., "An Experimental Study of Cutting Fluid Effects in Drilling" *Journal of Materials Processing Technology*, 71: 305-313, (1997).
- [11] Bağcı, E., Özcelik, B., "Finite element and experimental investigation of temperature changes on a twistdrill in sequential dry drilling" *Int J. Adv. Manufacturing Technology*, 28: 680-687, (2006).
- [12] Brandao, L. C., Coelho, R T., Lauro, C. H., "Contribution to Dynamic Characteristics of the Cutting Temperature in the Drilling Process Considering One Dimension Heat Flow", *Applied Thermal Engineering*, 31: 3806-3813, (2011).
- [13] Yağmur, S., Acır, A., Şeker, U., Günay, M., "Delik Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerinin Kesme Bölgesindeki Sıcaklığa Etkisinin Deneysel İncelenmesi" *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28(1): 1-6, (2013).
- [14] Tekait, İ., Demir, H., "AISI H13 ve AISI D2 Çeliklerinin Delinmesi Esnasında Kesme Bölgesinde Oluşan Sıcaklığa Kesici Takım Kaplamasının ve İşleme Parametrelerinin Etkisi", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* 30: 289-296, (2015).
- [15] Kayır Y. ve Usta M., "Üniversal torna tezgâhında içten soğutmalı karbür Matkaplarla AISI 1050 malzemesinin Delinmesinde kesme Kuvvetleri ve sıcaklık etkisinin araştırılması" *UMAS'2017*, 11-13 Eylül, Düzce, (2017).
- [16] Usta M. Ve Kayır Y., "GGG40 Malzemesinin CNC Torna Tezgahında Karbür Matkaplarla Delinmesinde Sıcaklık ve Delme Kuvvetlerinin Araştırılması", *MAKU FEBED*, 8: 231-238, (2017).
- [17] Kaynak, Y., "Matkap ile Delik Delme Esnasında Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvveti ve Sıcaklığın Değişimine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 58-69, (2006).
- [18] Kaplan, Y., Nalbant, M., Gökkaya, H., "AISI D2 ve AISI D3 Soğuk İş Çeliklerinin Delinmesinde İşleme Parametrelerinin Çapak Oluşumuna Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi", *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 1(1): 37-46, (2011).
- [19] DeGarmo, E.P., Black, J.T. and Kohser, R.A., "Materials and Processes in Manufacturing", Prentice-Hall Inc., New Jersey, 8th Edition, (1997).
- [20] Kalpakjian, S., Schmid, S.R., Musa, H., "Manufacturing Engineering and Technology", 6th Edition in SI Unit, Prentice Hall, (2009).