



ACADEMIC
PLATFORM



ISSN: 2147-4575

APJES

Journal of Engineering and Science

Volume: 8

Issue : 3

Year : 2020

Academic Platform Journal of Engineering and Science

Editor in Chief (Owned By Academic Perspective)

Prof. Dr. Mehmet SARIBIYIK, Sakarya University of Applied Sciences, Turkey
mehmets@subu.edu.tr

Editors

Prof. Dr. Barış Tamer TONGUÇ, Sakarya University, Turkey
btonguc@sakarya.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Özer UYGUN, Sakarya University, Turkey
ouygun@sakarya.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Mustafa CAN, Sakarya University of Applied Sciences, Turkey
mustafacan@subu.edu.tr

Members of Advisory Board

Prof. Dr. Abdullah Çavuşoğlu, Council of Higher Education, Turkey

Prof. Dr. Ahmet TÜRK, Celal Bayar University, Turkey

Prof. Dr. Erdal ÇELİK, Dokuz Eylül University, Turkey

Prof. Dr. Erol ARCAKLIOĞLU, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Turkey

Prof. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Turkey

Prof. Dr. Hüseyin AKILLI, Çukurova University, Turkey

Prof. Dr. Kutsi ERDURAN, Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN, University of West of England, England

Language Editor

Asst. Prof. Dr. Hakan ASLAN, Sakarya University, Turkey
haslan@sakarya.edu.tr

Support

Lec. Gökhan ATALI, Sakarya University, Turkey
gatali@subu.edu.tr



ISSN: 2147-4575

Contact



Academic Platform

info@apjes.com
<http://apjes.com/>

Academic Platform Journal of Engineering and Science

Field Editors

Dr. Ali SARIBIYIK
alisaribiyik@subu.edu.tr

Dr. Beytullah EREN
beren@sakarya.edu.tr

Dr. Fatih ÇALIŞKAN
fcaliskan@subu.edu.tr

Dr. Fuat ŞİMŞİR
fuatsimsir@karabuk.edu.tr

Dr. Halil ARSLAN
harslan@subu.edu.tr

Dr. Harun GÜL
harungul@subu.edu.tr

Dr. Mehmet UYSAL
mehmetu@sakarya.edu.tr

Dr. Metin YAMAN
myaman@sakarya.edu.tr

Dr. Mustafa CAN
mustafacan@subu.edu.tr

Dr. Mustafa Zahid YILDIZ
mustafayildiz@subu.edu.tr

Dr. Sinan Serdar ÖZKAN
sozkan@subu.edu.tr

Dr. Süleyman KALELİ
skaleli@subu.edu.tr

Dr. Taki DEMİR
tdemir@sakarya.edu.tr

Dr. Zafer ALBAYRAK
zalbayrak@karabuk.edu.tr

Guest Editors

Asst. Prof. Dr. Fatih ADAK
fatihadak@sakarya.edu.tr

Editorial Assistants

Res. Assist. Ahmet Hamdi SERDAR
ahmetserdar@subu.edu.tr

Res. Assist. M. Asım KESERCİOĞLU
mkesercioglu@subu.edu.tr

Res. Assist. Ayşe Nur AY
ay@subu.edu.tr

Res. Assist. Abdullah Feyzi KELEŞ
abdullahfeyzi@subu.edu.tr

Res. Assist. Mehmet Fatih YAŞAR
yasarm@subu.edu.tr



ISSN: 2147-4575

Contact

Academic Platform



info@apjes.com
http://apjes.com/

Contents

Optimization of Cutting Forces During Turning of Composite Materials (Research Paper)	423 - 431
Effect of the Oscillator Length on the Characteristics of a Feedback Type Fluidic Oscillator (Research Paper)	432 - 438
The Role of the Risk Manager in Enterprise Risk Management Maturity Level of Construction Companies (Research Paper)	439 - 449
The Effect of the Length of the Customer Event History and the Staying Power of the Predictive Models in the Customer Churn Prediction: Case Study of Migros Sanal Market (Research Paper)	450 - 455
Performance Analysis of Queue Management Algorithms Between Remote-Host and PG-W in LTE Networks (Research Paper)	456 - 463
Theoretical and Experimental Investigation of Carbon Monoxide, Humidity and Temperature Relations in Zonguldak Province of Turkey (Research Paper)	464 - 470
Mechanical and Microstructure Properties of Aluminum 1050 Alloy Joined with TIG Welding Method (Research Paper)	471 - 477
Performance of Organic and Inorganic Acids in the Extraction of Vanadium from Silica Sand by Leaching Method (Research Paper)	478 - 482
Theoretical Investigation on Static Analysis of Pultruded GFRP Composite Beams (Research Paper)	483 - 490
Numerical Analysis of Heat Transfer of a Brazed Plate Heat Exchanger (Research Paper)	491 - 499
Investigation of refrigeration system performance using infrared image processing techniques for R22 and its alternatives, R438A and R417A refrigerants (Research Paper)	500 - 513
Investigation on the Use of Metagabbro Aggregates in High Strength Concretes Made with Different Mineral Additives (Research Paper)	514 - 522
Implementation of a Vibration Absorbers to Euler-Bernoulli Beam and Dynamic Analysis of Moving Car (Research Paper)	523 - 532
Photocatalytic Dye Removal And Mineralization From Wastewater (Research Paper)	533 - 539

Contents

Determination of Appropriate Drying Temperature in Terms of Some Quality Values of Pear (<i>Pirus communis L.</i>) (Research Paper)	540 – 546
Whale Optimization Algorithm for Numerical Constrained Optimization (Research Paper)	547 – 554
Investigation of the Effect of Mesh Geometric Shapes on Pressure Behavior in Dynamic Simulations (Research Paper)	555 – 564
Reduction of Nitric Oxide Emission in Gold Recycling Process (Research Paper)	565 – 571
Improvement of Surface Properties of Stainless Steels by Thermal Spray Process (Research Paper)	572 – 579
Physical Insights into the Bio-preservation of Proteins by Glassy Solvents: Why is Glycerol better than Trehalose at low Temperatures? (Research Paper)	580 – 584
Analysis of English Level in Turkey with Adaptive Online English Proficiency Exam (Research Paper)	585 - 595

İçindekiler


Kompozit Malzemelerin Tornalanması Esnasında Oluşan Kesme Kuvvetlerinin Optimizasyonu (Araştırma Makalesi)	423 - 431
Effect of the Oscillator Length on the Characteristics of a Feedback Type Fluidic Oscillator (Araştırma Makalesi)	432 - 438
Yapım Firmalarının Kurumsal Risk Yönetimi Olgunluğunda Risk Yöneticisinin Rolü (Research Paper)	439 - 449
The Effect of the Length of the Customer Event History and the Staying Power of the Predictive Models in the Customer Churn Prediction: Case Study of Migros Sanal Market (Araştırma Makalesi)	450 - 455
LTE Ağlarda Remote-Host ile PG-W arasındaki Kuyruk Yönetim Algoritmalarının Performans Analizi (Araştırma Makalesi)	456 - 463
Theoretical and Experimental Investigation of Carbon Monoxide, Humidity and Temperature Relations in Zonguldak Province of Turkey (Araştırma Makalesi)	464 - 470
TİG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmiş Alüminyum 1050 Alaşımının Mekanik Ve Mikroyapı Özellikleri (Araştırma Makalesi)	471 - 477
Performance of Organic and Inorganic Acids in the Extraction of Vanadium from Silica Sand by Leaching Method (Araştırma Makalesi)	478 - 482
Theoretical Investigation on Static Analysis of Pultruded GFRP Composite Beams (Araştırma Makalesi)	483 - 490
Numerical Analysis of Heat Transfer of a Brazed Plate Heat Exchanger (Araştırma Makalesi)	491 - 499
R22 ve Alternatifleri R438A ile R417A Soğutucu Akışkanları için Kızılötesi Görüntü İşleme Teknikleri Kullanarak, Soğutma Sistem Performansının İncelenmesi (Araştırma Makalesi)	500 - 513
Farklı Mineral Katkılı Yüksek Dayanımlı Betonlarda Metagabro Agregalarının Kullanılabilirliğinin Araştırılması (Araştırma Makalesi)	514 - 522
Implementation of a Vibration Absorbers to Euler-Bernoulli Beam and Dynamic Analysis of Moving Car (Araştırma Makalesi)	523 - 532
Atıkudan Fotokatalitik Yöntemle Boya Giderimi Ve Mineralizasyonu (Araştırma Makalesi)	533 - 539


İçindekiler


Armut (<i>Pirus communis L.</i>) Posasının Bazı Kalite Değerleri Açısından Uygun Kurutma Sıcaklığının Belirlenmesi (Araştırma Makalesi)	540 – 546
Whale Optimization Algorithm for Numerical Constrained Optimization (Araştırma Makalesi)	547 – 554
Dinamik Simülasyonlarda Ağ Örgüsü Geometrik Şeklinin Basınç Davranışına Etkisinin Araştırılması (Araştırma Makalesi)	555 – 564
Altın Geri Dönüşüm Prosesindeki Azot Oksit Emisyonunun Düşürülmesi (Araştırma Makalesi)	565 – 571
Termal Sprey Prosesi İle Paslanmaz Çeliklerin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi (Araştırma Makalesi)	572 – 579
Physical Insights into the Bio-preservation of Proteins by Glassy Solvents: Why is Glycerol better than Trehalose at low Temperatures? (Araştırma Makalesi)	580 – 584
Uyarlanabilir Çevrimiçi İngilizce Seviye Tespit Sınavı ile Türkiye'deki İngilizce Seviyesinin Analizi (Araştırma Makalesi)	585 - 595


Kompozit Malzemelerin Tornalanması Esnasında Oluşan Kesme Kuvvetlerinin Optimizasyonu


¹*Emin Salur, ²Abdullah Aslan, ³Mustafa Kuntoğlu, ⁴Aydın Güneş, ⁵Ömer Sinan Şahin

¹Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Konya,
esalur@selcuk.edu.tr 

²Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya,
aaslan@selcuk.edu.tr 

³Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya,
mkuntuoglu@selcuk.edu.tr 

⁴Abdullah Gül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kayseri,
aydin.gunes@agu.edu.tr 

⁵Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya,
ossahin@ktun.edu.tr 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 09.10.2019

Kabul Tarihi: 25.01.2020

Öz

Kompozit malzemeler kullanılacağı yere göre tasarlanan ve üretilen malzemelerdir. Dolayısıyla kompozit malzemeler aynı üretim metodu kullanılarak kullanılacağı yere göre farklı üretim parametrelerinde üretilebilir. Farklı üretim parametrelerinde üretilen kompozit malzemeler farklı mekanik özelliklere sahip olacağı için bu durum kompozit malzemelerin işlenebilirlik özelliklerini etkiler. Bu sebeple kompozit malzemelerin işlenmesi esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin tespit edilmesi ve optimizasyonu önem arz etmektedir. Bu kapsamda, 3 farklı üretim sıcaklığı (350, 400 ve 450°C) ve basıncı (480, 640 ve 820 MPa) ile 4 farklı karışım oranında (ağ. %10, ağ. %20, ağ. %30, ağ. %40) üretilen dökme demir (GGG-40) takviyeli ve bronz matrisli (CuSn10) kompozit malzemelerin kuru kesme şartlarında tornalanması esnasında kesme kuvvetlerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tam faktöriyel tasarım prensibi ile 36 deney yapılmış ve üç eksenli kesme kuvvetleri ölçümü alınarak bileşke kesme kuvveti hesabı yapılmıştır. Deneyler esnasında kesme şartları sabit tutulmuştur (kesme hızı=50 m/dak, ilerleme=0,128 mm/dev ve talaş derinliği=1 mm). Varyans analizi (ANOVA) neticesinde bileşke kesme kuvveti üzerine en çok etkisi olan parametrenin %80 katkı oranıyla birlikte üretim basıncı olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kompozit malzemeler, tornalama, optimizasyon, kesme kuvvetleri, varyans analizi

Optimization of Cutting Forces During Turning of Composite Materials

*¹Emin Salur, ²Abdullah Aslan, ³Mustafa Kuntoğlu, ⁴Aydın Güneş, ⁵Ömer Sinan Şahin

¹Selçuk University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Science Engineering, Konya,
esalur@selcuk.edu.tr

² Selçuk University, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Konya,
aaslan@selcuk.edu.tr

³ Selçuk University, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Konya,
mkuntuoglu@selcuk.edu.tr

⁴Abdullah Gül University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kayseri,
aydin.gunes@agu.edu.tr

⁵Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, Konya,
ossahin@ktun.edu.tr

Abstract

Composites are the type of materials designed and produced according to their usage area. Therefore, composite materials can be produced in accordance with the usage area using the same production method. This situation affects the machinability

*Sorumlu Yazar: Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, esalur@selcuk.edu.tr, Tel: +90 (332) 223 33 92

Doi: 10.21541/apjes.631260

properties of composites, owing to the fact that different production parameters cause different mechanical properties. For this reason, it is important that the determination and optimization of cutting forces during machining of composite materials. In this context, the optimization of cutting forces of bronze matrix (CuSn10) composites which are reinforced with cast iron (GGG-40) produced using 3 different production temperatures (350,400 and 450°C) and pressure (480, 640 and 820 MPa) and 4 different reinforcement (wt. %10, wt. %20, wt. %30, wt. %40) during dry turning. Full factorial design based 36 experiments were performed and resultant force calculation was carried out with measurement of cutting forces in 3 axes. During experiments cutting conditions were kept constant (cutting speed=50 m/min, feed rate=0,128 mm/rev and depth of cut=1 mm). As a result of analysis of variance (ANOVA), it was found that the parameter which has the most effect on the cutting forces is the production pressure with 80% contribution rate.

Keywords: Composite materials, turning, optimization, cutting forces, analysis of variance

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, kullanılacağı ortama göre tasarlanıp üretilebilmesi sebebiyle endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır [1, 2]. Matris ve takviye malzemesi olarak iki temel bileşenden oluşan kompozit malzemeler, matris yapısına göre, polimer matris, seramik matris ve metal matrisli kompozitler olarak sınıflandırılırlar [3, 4]. Metal matrisli kompozit malzemeler (MMK), yüksek tokluk ve mukavemet sağlamaları, kullanılan matris ve takviye malzemesine bağlı olarak sıra dışı ısı ve elektriksel özellikleri, biçimlendirilebilme özellikleri sebebiyle birçok uygulamada tercih edilir [5]. Metal matrisli kompozit malzemeler, haddeleme [6], sıcak ekstrüzyon [7, 8], , soğuk presleme [9], sıcak presleme [10, 11], yüksek sıcaklıkta burulma [12], in situ [13] gibi yöntemlerle üretilebilirler. Yapılan literatür incelemesinde, bronz [14], pirinç [15], alüminyum [16, 17], magnezyum [18] malzemelerinin kompozit malzeme üretiminde sıkça kullanıldığı görülmektedir. Metal matrisli kompozit malzemelerin darbe [19], basma [14], eğilme [11], sertlik ve gözeneklilik [14], gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra işlenebilirlik özellikleri [20, 21] de oldukça önemlidir. Yapılan literatür incelemesinde, alüminyum [22], titanyum [23], magnezyum [24] malzemeleri ile üretilen MMK malzemelerin ve seramik takviyeli [25, 26] MMK malzemelerin işleme parametreleri ile alakalı sonuçların rapor edildiği tespit edilmiştir.

Kompozit malzemelerin işlenebilirlik özellikleri incelenirken, genellikle malzemenin üretim parametreleri (üretim sıcaklığı, basıncı, karışım oranı) sabit tutulmuş ve işleme parametreleri (kesme ve ilerleme hızı) değişken hale getirilerek işleme parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Bu durum kullanılacağı yere göre farklı parametrelerde üretilen kompozit malzemelerin işlenebilirlik özelliklerini belirlemede yeterli değildir. Örneğin bir malzeme, sadece bir üretim parametresini değiştirerek yüksek mukavemetli bir yatak malzemesinde düşük mukavemetli ve yüksek gözenekli bir filtre malzemesine dönüşebilir [14]. Bu sebeple üretim parametrelerinin kesme kuvvetlerine etkisini belirlemek oldukça önemlidir. Üretim parametrelerinin etkilerinin belirlenebilmesi için istatistiksel yaklaşımlar [27, 28] ve tahmin araçları [29, 30] kullanılmaktadır.

Metal matrisli kompozit malzemelerin kullanılacağı yere ve şartlara göre tasarlanması sürecinde seçilen alaşım elementleri, takviye malzemesi ve takviye malzemesi oranı, ileri imalat sürecinde malzemenin işlenebilirliğini doğrudan

etkilemektedir. Talaşlı imalat işlemlerinde iş parçası olarak kullanılan malzemenin içerisindeki düzensizlikler ve sert parçacıklar, işlemin süreksizliğine, kesici takım aşınmalarına ve yüzey kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır. MMK malzemelere belirli özellikler kazandırmak için kullanılan takviye elemanları, işleme karakteristiğini etkilemekte ve kesme bölgesinde anlık değişimler meydana getirmektedir. Özellikle kesici takım ve iş parçası temas alanının kesme işlemi süresince değişimler göstermesi kesme kuvvetlerinin ve kesici takıma gelen yükün anlık olarak değişmesi sonucunu doğurmaktadır. Değişken yük, yüksek sıcaklık ve basıncın da etkisiyle kesici ucun ömrünü erken tamamlamasına, iş parçasının düşük kaliteli olmasına yol açar [31]. Bu faktörler göz önüne alındığında MMK malzemelerin işlenmesinde kesme kuvvetlerinin takibi ve sonuçlarının değerlendirilmesi kaçınılmaz olmaktadır.

Geçmişte, çeşitli kompozit malzemelerin farklı talaşlı imalat yöntemleriyle şekillendirilmesi ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Bunlar, aynı malzemenin farklı kesme şartlarında işlendiği [28, 32-34] ve farklı kompozisyon oranlarında ve farklı kesme şartlarında [35-38] işlendiği çalışmalar olarak iki grupta incelenebilir. Bu çalışmalar dikkate alındığında literatürde bir eksiklik görülmüş ve bu eksiklik doğrultusunda deneysel ve istatistiksel analize dayanan bir çalışmanın yapılması uygun görülmüştür.

Bu çalışmada farklı üretim şartları altında üretimi yapılan 36 adet metal matrisli kompozit malzeme, sabit kesme parametrelerinde tormalanmış ve tormalama esnasında oluşan kesme kuvvetleri dinamometre yardımıyla ölçülmüştür. 3 ekseninde ölçümü yapılan kesme kuvvetleri hesaplanarak bileşke kesme kuvveti bulunmuştur. Malzemelerin üretim parametreleri olan basınç, sıcaklık ve karışım oranının kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri istatistiksel analiz ile değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Üretim ve Tormalama

Bu çalışmada kullanılan metal matrisli kompozit malzemelerin üretimi [14, 39] literatürde yer alan çalışmalarda detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. 1 ve 2 mm boyutları arasındaki bronz ve dökme demir talaşları 350,

400, 450 °C sıcaklıkta 480, 640, 820 MPa basınçta sıcak presleme yöntemiyle birleştirilmektedir. Bronz matris içerisindeki takviye dökme demir oranı ise ağırlık % 10, 20, 30 ve 40'dır. Deneysel tasarımda kullanılan faktörler ve faktör seviyeleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Sıcak presleme sonrasında kalıptan çıkarılan silindirik numuneler Tablo 2'de gösterilen şartlarda tormalanmaktadır. Her bir deney için

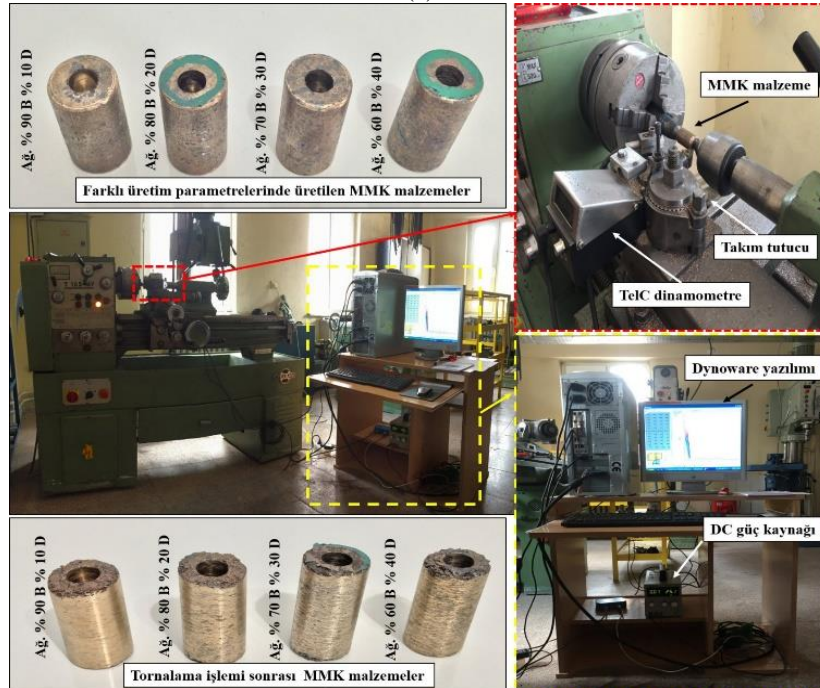
bir adet numune kullanılmış ve ayrı bir kesici uç ile tormalama yapılmıştır. Tormalama esnasında oluşan kesme kuvvetleri (F_c , F_f , F_r) dinamometre ile ölçülerek bileşikleri alınmıştır (F_b). Deneyde kullanılan TELC markalı dinamometre saniyede 10 veri ölçebilmekte ve doğrudan bilgisayara veri aktarabilmektedir. Kompozit malzemelerin üretimi ve tormalanması Şekil 1 de gösterilmektedir.

Tablo 1. Faktörler ve Faktör Seviyeleri

Sembol	Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
B	Basınç (MPa)	480	640	820	-
S	Sıcaklık (°C)	350	400	450	-
K	Karışım Oranı (ağırlık %)	10	20	30	40



(a)



(b)

Şekil 1. MMK malzemelerin (a) üretimi ve (b) tormalanması.

Tablo 2. Tornalamada Deneysel Şartlar

Malzeme	Özellikler
Takım Tezgâhı	T-165 MF Üniversal Torna
Kesici Takım	TCMT 16T304 – Böhler
Kesici Takım Geometrisi	Yaklaşma Açısı: 60°
Kesici Takım Tutucu	R/L 140 0 20 16 – Takımsaş
Kesme Hızı	50 m/dak
İlerleme	0,128 mm/dev
Talaş Derinliği	1 mm
Kesme Sıvısı	Yok

2.2. Varyans Analizi (ANOVA)

Dökme demir takviyeli bronz matrisli kompozit malzemelerin üretim parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerine etkisini incelemek için “Minitab 16.0” yazılımı kullanılarak varyans analizi yapılmıştır. Analiz için basınç, sıcaklık ve karışım oranı bağımsız değişkenler olarak seçilmiştir. Dinamometre ile ölçümü yapılan üç eksendeki kesme kuvvetlerinden yola çıkarak bileşke kesme kuvveti hesaplanmıştır. Bileşke kesme kuvveti bağımlı değişken olarak belirlenmiş ve tam faktöriyel tasarım ilkesine göre 36 deneyin istatistiksel analizi yapılmıştır. 3'er adet basınç ve sıcaklık değerinin yanı sıra 4 adet karışım oranı istatistiksel olarak düzenlenmiş ve Minitab programında tanımlanmıştır.

İstatistiksel analiz, Taguchi deney tasarımına bağlı olarak yapılmış ve sinyal-gürültü oranları da hesaplanarak optimizasyon yapılmıştır. Taguchi yaklaşımı, sinyal-gürültü oranının yanı sıra ortogonal diziler de içeren, bu sayede deney sayısını ve gürültü faktörlerinin etkisini azaltmayı amaçlayan bir tasarımdır. Taguchi tasarımında bulunan 4 amaç fonksiyonu arasında “küçük olan iyidir” (smaller is better) prensibine dayanan yaklaşım tercih edilmiştir. Bunun nedeni tornalama esnasında kesici takım üzerine gelen kesme kuvvetlerinin mümkün oldukça küçük olmasının istenmesidir. Bu yaklaşım için kullanılan matematiksel formül denklem 1'de verilmiştir. Denklemde y her deneydeki üretim parametrelerinin kareleri toplamını verirken, n ise toplam parametre sayısını ifade etmektedir.

$$S/N = -10 \log 1/n (\Sigma y^2) \quad (1)$$

Sonuç olarak basınç, sıcaklık ve karışım oranından oluşan girdi parametrelerinden her birinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi veya katkı oranları bulunmuştur. Ayrıca her girdi parametresinin en küçük kesme kuvvetini verecek seviyesi de tespit edilerek kesme kuvveti optimizasyonu yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tornalama işleminde, talaş kaldırırken kesici takım ve iş parçasının birbirine göre bağıl hareket etmesi esnasında kesici takımın ilerleme ekseninde (Ff) bir kuvvet meydana gelir. Bu kuvvete dik iki eksen üzerinde ise, kesici takımı tezgâhtan dışarı itmeye zorlayan (Fp) ve aşağı doğru bastıran esas kesme kuvveti (Fc) oluşmaktadır. Meydana gelen bu kuvvetler, takım aşınması, kesici uçta ısı oluşumu, titreşimler ve parça kalitesi gibi birçok faktör üzerinde etkili olmaktadır. Kesme işleminin çok küçük fakat yüksek hızlar ve basıncın etkili olduğu bir alanda gerçekleşmesi kesme kuvvetlerinde kısa sürede çok hızlı değişimlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda tornalama dinamometresi kesme bölgesinin hemen altında olması ve uzama ölçerli (strain gage) yaklaşımla ölçme yapması sebebi ile güvenilir ve anlamlı bilgi akışı sağlamaktadır. MMK malzemelerin işlenmesi esnasında kesme kuvvetlerinin takip edilmesi, üretim parametrelerinin malzeme yapısını nasıl etkilediği konusunda önemli sonuçların belirlenmesini sağlamıştır. Böylece, kesme kuvvetlerinde meydana gelen değişimlerin üretim parametrelerine bağlı sebepleri anlaşılmış olacaktır. Üretilen MMK malzeme yapısı anizotropik olduğu için işleme esnasında oluşan tüm kuvvetlerin etkisini değerlendirebilmek adına üç eksendeki kuvvetlerin bileşkesi alınmıştır. Bileşke kuvvet hesabı aşağıdaki denklemden faydalanılarak yapılmıştır.

$$F_b = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (2)$$

Tablo 3'te tam faktöriyel tasarım ilkesine göre düzenlenmiş ve içerisinde deneysel tasarımın bağımsız değişkenleri olan basınç, sıcaklık ve karışım oranı ile bağımlı değişkenleri olan kesme kuvveti bileşenleri ve bileşke kesme kuvveti bulunmaktadır. Ayrıca, her deney için bileşke kesme kuvvetine ait sinyal-gürültü oranları da hesaplanmıştır. Buna göre en düşük bileşke kesme kuvvetini veren deneysel şartlar B3 ve S3 değerlerinin bulunduğu karışım oranlarında elde edilmektedir. Hem sinyal gürültü oranları hem de bileşke kesme kuvveti değerleri incelendiğinde sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Sıcak presleme ile üretim tekniğinde sertlik dağılımını etkileyen en önemli parametre üretim basıncı, mekanik kilitlenme (dökme demir talaşlarının bronz talaşları tarafından kaplanması) mekanizmasını etkileyen en önemli parametre ise sıcaklıktır [39]. Şekil 2'de farklı üretim şartları kombinasyonlarında bileşke kesme kuvvetinin değişimi görülmektedir.

Şekil 2a'da yüksek basınç değerlerinde sıcaklık artışı ile bileşke kesme kuvvetinin azaldığı, basınç değeri düştükçe sıcaklığın artışı ile bileşke kesme kuvvetinin arttığı görülmektedir.

Hem üretim basıncı hem de üretim sıcaklığının yüksek olması, bronz talaşlarının aşırı plastik deformasyon göstermesine ve mukavemetinin düşmesine neden olmaktadır [4]. Bu durum mekanik kilitlenme mekanizmasını olumsuz etkileyerek daha kolay işlenmesine diğer bir deyişle kuvvetin azalmasına neden olmaktadır. Basınç değeri düştüğünde ise plastik deformasyon sadece sıcaklığın kontrolünde gerçekleştiği için daha etkili bir birleşme oluşur ve işleme kuvveti artar [21].

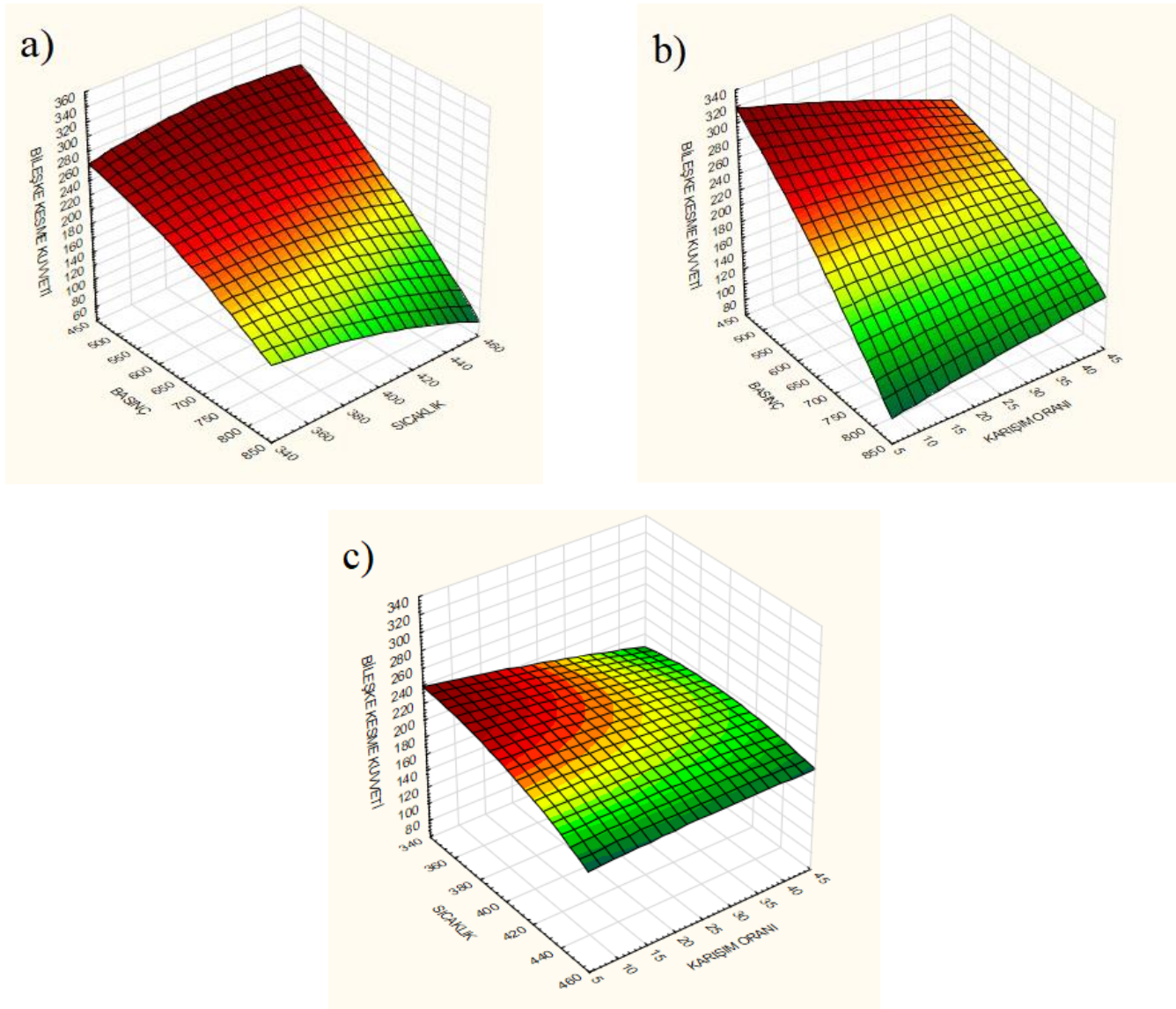
Şekil 2b'de yüksek basınç değerlerinde karışım oranının artışı ile bileşke kesme kuvvetinin arttığı, basıncın düşmesi ile birlikte karışım oranındaki artışın bileşke kesme kuvvetini azalttığı görülmektedir. Bu durum, bronzla kıyasla daha sert olan dökme demir talaşlarının oranının artması

sebebiyle kompozit malzemenin yapısal bütünlüğünün (mekanik kilitlenmenin) sağlanabilmesi için daha fazla basınca ihtiyaç duymasından kaynaklanmaktadır. Aslan ve ark. [39] tarafından yapılan çalışmada düşük basınçlı ve yüksek dökme demir içerikli numunelerde gözeneklilik değerlerinin yüksek çıkması bu durumu destekler niteliktedir.

Şekil 2c'de ise diğer iki grafikten ayrı olarak en düşük ve en yüksek kuvvet değerleri arasındaki farkın oldukça az olduğu görülmektedir. Çünkü yukarıda da belirtildiği gibi sertlik profili üzerindeki en etkili parametre basınçtır. Bu durum Tablo 3'teki katkı oranları ile kıyaslandığında, sıcaklık ve karışım oranının kesme kuvveti üzerinde etkisinin az olması sonucu ile de uyumludur.

Tablo 3. Tam Faktöriyel Deneysel Tasarım

Deneysel No	Bağımsız Değişkenler			Bağımlı Değişkenler				
	Basınç	Sıcaklık	Karışım Oranı	Kesme Kuvvetleri				
	B (MPa)	S (°C)	K (ağ. %)	Fc (N)	Ff (N)	Fp (N)	Fb (N)	Fb için S/N oranı
1	480	350	10	118,86	131,20	217,36	280,33	-48,9536
2	480	350	20	118,50	138,64	195,97	267,71	-48,5534
3	480	350	30	133,00	148,97	191,16	276,42	-48,8327
4	480	350	40	118,66	97,49	127,92	199,87	-46,0152
5	480	400	10	141,83	165,11	247,16	329,34	-50,3530
6	480	400	20	133,97	156,72	210,76	394,83	-49,3917
7	480	400	30	136,39	142,19	199,68	280,52	-48,9594
8	480	400	40	136,76	120,85	162,37	244,28	-47,7580
9	480	450	10	128,59	137,16	192,60	269,15	-48,6002
10	480	450	20	136,79	144,79	206,88	287,19	-49,1635
11	480	450	30	136,68	131,46	175,78	258,58	-48,2519
12	480	450	40	140,58	127,87	162,84	250,26	-47,9681
13	640	350	10	110,41	138,38	180,49	252,81	-48,0561
14	640	350	20	121,66	133,69	179,32	254,62	-48,1181
15	640	350	30	105,20	93,64	131,23	192,50	-45,6889
16	640	350	40	127,09	114,01	145,01	224,01	-47,0056
17	640	400	10	110,03	122,50	135,17	213,03	-46,5692
18	640	400	20	114,13	119,01	137,32	214,58	-46,6321
19	640	400	30	118,59	113,70	115,81	201,00	-46,0642
20	640	400	40	125,86	121,70	133,00	219,86	-46,8433
21	640	450	10	107,42	100,99	135,14	200,00	-46,0208
22	640	450	20	110,33	106,53	123,36	196,82	-46,8817
23	640	450	30	113,96	115,29	128,41	206,80	-46,3113
24	640	450	40	113,14	94,81	116,94	188,32	-45,4983
25	820	350	10	95,19	86,05	82,13	152,35	-43,6573
26	820	350	20	102,18	98,61	96,05	171,44	-44,6824
27	820	350	30	92,06	77,23	78,32	143,44	-43,1335
28	820	350	40	107,79	90,20	87,01	165,31	-44,3660
29	820	400	10	92,48	65,73	52,36	124,96	-41,9360
30	820	400	20	91,45	64,62	30,53	116,07	-41,2946
31	820	400	30	101,30	71,38	63,49	139,25	-42,8759
32	820	400	40	105,25	71,18	61,50	141,16	-42,9945
33	820	450	10	74,11	39,76	16,74	85,75	-38,6655
34	820	450	20	73,26	42,09	19,99	86,83	-38,7736
35	820	450	30	81,27	42,09	23,41	94,47	-39,5065
36	820	450	40	91,85	52,47	42,57	114,03	-41,1407



Şekil 2. Farklı üretim şartları kombinasyonlarında bileşke kesme kuvveti değişimi a) Basınc-Sıcaklık, b) Basınc-Karışım Oranı, c) Sıcaklık-Karışım Oranı

Tablo 4, sinyal-gürültü oranına göre bileşke kesme kuvveti için varyans analizi sonuçlarını göstermektedir. Her bir bağımsız değişkene ait kareler toplamı değerinin toplam değere bölünmesi ile bulunan katkı oranı ve F-değeri sonuçlarına göre basınç, bileşke kesme kuvveti üzerinde en etkili parametre olarak bulunmuştur (80%). Basıncı takiben sıcaklık (5%) ve karışım oranı (0,003) kuvvet üzerinde oldukça düşük etkiye sahip olarak bulunmuştur. Taguchi bazlı varyans analizinin sonuçları yeterli güvenilirlikte bulunmuştur ($R-Sq = 86,7\%$ ve $R-Sq(adj) = 83,3\%$). Normal şartlar altında, geleneksel malzemelerin istatistiksel

analizlerinde, üretim şartlarının sabit olması ve kompozit malzemelere kıyasla izotropik özellikler göstermesi sebebiyle $R-Sq$ oranları daha yüksek çıkmaktadır. Ancak, kendi içerisinde birçok değişkeni olan (üretim sıcaklığı, basınç, karışım oranı, tane düzensizliği) ve bu değişkenlere bağlı olarak anizotropik özellikler gösteren kompozit malzemelerde %87 mertebelerinde güvenilirlik oranı elde edilmesi oldukça önemlidir. Dolayısıyla bu istatistiksel yaklaşımın, kompozit malzemeler için etkili bir şekilde kullanılabileceği söylenebilir.

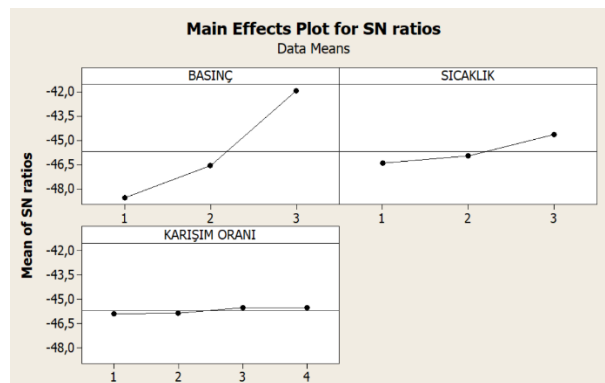
Tablo 4. Sinyal-gürültü oranına göre bileşke kesme kuvveti için varyans analizi sonuçları

Bağımsız Değişkenler	SD	Kareler Toplamı	Ortalamalar	F-Değeri	P-Değeri	Katkı Oranı
Basınç	2	278,989	139,495	84,59	0,000	80 %
Sıcaklık	2	20,401	10,200	6,19	0,006	5 %
Karışım Oranı	3	1,036	0,345	0,21	0,889	0,3 %
Hata	28	46,172	1,649	-	-	14,7 %
Toplam	35	346,597	-	-	-	100 %

Tablo 5'te ve Şekil 3'te sinyal-gürültü oranına göre elde edilen sonuçlar bulunmaktadır. Derece ile ifade edilen değerler sırası ile kesme kuvveti üzerindeki etkili parametreleri ifade etmektedir. Tablo.5' de görüldüğü üzere kesme kuvvetleri üzerinde en etkili parametrenin sırasıyla basınç, sıcaklık ve karışım oranı olduğu tespit edilmiştir. Varyans analizi tablosunda bulunan katkı oranı sonuçları burada da bulunmuş ve basınç, sıcaklık, karışım oranı sıralaması ile değişkenlerin etkinliği doğrulanmıştır. En küçük kesme kuvveti değerini veren değişken seviyeleri ise koyu renkli yazı ile işaretlenmiştir. Buna göre optimum kesme kuvveti basıncın ve sıcaklığın üçüncü derece, karışım oranının birinci değerlerinin seçilmesi ile elde edilmektedir (B₃=820 MPa, S₃=450°C, K₁=ağ. %10 GGG-40 takviyeli).

Tablo 5. Sinyal-gürültü oranları için elde edilen sonuçlar

Seviye	Basınç	Sıcaklık	Karışım Oranı
1	-48,57	-46,92	-45,87
2	-46,56	-45,97	-45,83
3	-41,92	-44,65	-45,51
4	-	-	-45,51
Δ	6,65	1,77	2,442
Derece	1	2	3

**Şekil 3.** Sinyal-gürültü oranları için elde edilen sonuçlar

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada metal matrisli kompozit malzemelerin işlenebilirliği ve üretim parametrelerinin tornalama esnasında oluşan kesme kuvvetlerine etkisi incelenmiştir. Tüm üretim parametrelerinin kesme kuvvetine etkisi istatistiksel bir yaklaşımla incelenerek birbirinden bağımsız bir şekilde etki oranları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır.

- S / N oranları kullanılarak kesme kuvvetlerini en aza indirmek için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri belirlenmiştir. Kesme kuvveti için optimum durumlar üretim basıncı olarak B₃=820 MPa, üretim sıcaklığı olarak S₃=450°C, katkı oranı olarak ise K₁=ağ. %10 GGG-40 takviyeli şekilde belirlenmiştir.
- Yapılan istatistiksel analizlerin sonucuna bakılarak sıcak presleme yöntemi ile üretilen metal matrisli kompozit malzemelerin bileşke kesme kuvveti üzerine en çok etkisi olan parametrenin %80 katkı oranıyla birlikte üretim basıncı olduğu tespit edilmiştir. Tornalama sırasında oluşan bileşke kuvvetler üzerinde sıcaklık ve katkı oranının etkisinin basınca göre çok az olduğu gözlemlenmiştir.
- Yapılan istatistiksel yaklaşımın güvenilirlik oranı %86,7 olarak tespit edilmiş ki bu da uygulanan modelin kompozit malzemeler için etkili bir şekilde kullanılabileceğinin göstergesidir.
- Tornalama esnasında (üretimden kaynaklanan bazı istisnai durumlar dışında) genel olarak en düşük bileşke kuvvetler, üretim basıncının en yüksek olduğu değerlerde gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek basınç değerlerine çıktığında, metalik talaşların yumuşayarak birbirlerini daha iyi kaplaması ve daha iyi yapısal bütünlük sağlamasına bağlı olarak numunelerin işlenebilirliğinin artmasından kaynaklanmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] H. Sepet, N. Tarakcioglu, and R. Misra, "Determination of the mechanical, thermal and physical properties of nano-CaCO₃ filled high-density polyethylene nanocomposites produced in an industrial scale," *J Compos Mater*, vol. 50, no. 24, pp. 3445-3456, 2016.
- [2] H. Sepet, B. Aydemir, and N. Tarakcioglu, "Evaluation of mechanical and thermal properties and creep behavior of micro-and nano-CaCO₃ particle-filled HDPE nano-and microcomposites produced in large scale," *Polymer Bulletin*, pp. 1-19, 2019.
- [3] A. Aslan, O. S. Sahin, E. Salur, A. Gunes, A. Akdemir, and H. B. Karadağ, "A new method for recycling of metal chips," *Journal of Selçuk University Natural and Applied Science*, vol. 4, no. 1, pp. 1-12, 2015.
- [4] A. Aslan, E. Salur, A. Gunes, O. Sahin, H. Karadağ, and A. Akdemir, "The mechanical properties of composite materials recycled from waste metallic chips under different pressures," *International Journal of Environmental Science and Technology*, pp. 1-8, 2019.
- [5] K. K. Chawla, "Metal matrix composites," *Mater Sci Tech-Lond*, 2006.
- [6] S. R. Bakshi, D. Lahiri, and A. Agarwal, "Carbon nanotube reinforced metal matrix composites-a review," *International materials reviews*, vol. 55, no. 1, pp. 41-64, 2010.
- [7] J. Kaczmar, K. Pietrzak, and W. Włosiński, "The production and application of metal matrix composite materials," *Journal of materials processing technology*, vol. 106, no. 1-3, pp. 58-67, 2000.
- [8] H. Kwon, M. Estili, K. Takagi, T. Miyazaki, and A. Kawasaki, "Combination of hot extrusion and spark plasma sintering for producing carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites," *Carbon*, vol. 47, no. 3, pp. 570-577, 2009.
- [9] J. Fogagnolo, E. Ruiz-Navas, M. Simón, and M. Martinez, "Recycling of aluminium alloy and aluminium matrix composite chips by pressing and hot extrusion," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 143, pp. 792-795, 2003.
- [10] F. Tang, I. E. Anderson, T. Gnaupel-Herold, and H. Prask, "Pure Al matrix composites produced by vacuum hot pressing: tensile properties and strengthening mechanisms," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 383, no. 2, pp. 362-373, 2004.
- [11] A. Aslan, E. Salur, A. Güneş, Ö. S. Şahin, H. B. Karadağ, and A. Akdemir, "Production and mechanical characterization of prismatic shape machine element by recycling of bronze and cast-iron chips," *J Facul Eng Archit Gazi Univ*, vol. 33, no. 3, pp. 1013-1027, 2018.
- [12] I. Sabirov, O. Kolednik, and R. Pippan, "Homogenization of metal matrix composites by high-pressure torsion," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 36, no. 10, pp. 2861-2870, 2005.
- [13] S. C. Tjong and Z. Ma, "Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 29, no. 3-4, pp. 49-113, 2000.
- [14] A. Aslan, "Production of metal matrix composites by recycling of waste metal chips and their mechanical properties," Ms Thesis, Selçuk University, Department of Mechanical Engineering, Konya, 2014.
- [15] S. Lo, S. Dionne, M. Sahoo, and H. Hawthorne, "Mechanical and tribological properties of zinc-aluminium metal-matrix composites," *J Mater Sci*, vol. 27, no. 21, pp. 5681-5691, 1992.
- [16] J. Gronostajski, J. Kaczmar, H. Marciniak, and A. Matuszak, "Direct recycling of aluminium chips into extruded products," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 64, no. 1-3, pp. 149-156, 1997.
- [17] J. Gronostajski, H. Marciniak, and A. Matuszak, "New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling," *Journal of materials processing technology*, vol. 106, no. 1-3, pp. 34-39, 2000.
- [18] Y. Tao, M.-Y. Zheng, X.-S. Hu, and W. Kun, "Recycling of AZ91 Mg alloy through consolidation of machined chips by extrusion and ECAP," *T Nonferr Metal Soc*, vol. 20, pp. s604-s607, 2010.
- [19] Ö. S. Şahin, A. Güneş, A. Aslan, E. Salur, H. B. Karadağ, and A. Akdemir, "Low-velocity impact behavior of porous metal matrix composites produced by recycling of bronze and iron chips," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, pp. 1-8, 2017.
- [20] E. Salur, "Investigation of machinability properties of metal matrix composites produced by recycling of waste metal chips," Ms thesis, Selçuk University, Department of Mechanical Engineering, Konya, 2017.
- [21] E. Salur, A. Aslan, M. Kuntoglu, A. Gunes, and O. S. Sahin, "Experimental study and analysis of machinability characteristics of metal matrix composites during drilling," *Composites Part B: Engineering*, vol. 166, pp. 401-413, 2019.
- [22] Ş. Karabulut and H. Karakoç, "Investigation of surface roughness in the milling of Al7075 and open-cell SiC foam composite and optimization of machining parameters," *Neural Computing and Applications*, vol. 28, no. 2, pp. 313-327, 2017.
- [23] S. A. Niknam, S. Kamalizadeh, A. Asgari, and M. Balazinski, "Turning titanium metal matrix composites (Ti-MMCs) with carbide and CBN inserts," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, no. 1-4, pp. 253-265, 2018.
- [24] M. M. Barzani, S. Farahany, and V. Songmene, "Machinability characteristics, thermal and mechanical properties of Al-Mg₂Si in-situ composite with bismuth," *Measurement*, vol. 110, pp. 263-274, 2017.
- [25] J. d. Torralba, C. Da Costa, and F. Velasco, "P/M aluminum matrix composites: an overview," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 133, no. 1-2, pp. 203-206, 2003.
- [26] R. N. Rai, G. Datta, M. Chakraborty, and A. Chattopadhyay, "A study on the machinability behaviour of Al-TiC composite prepared by in situ technique," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 428, no. 1-2, pp. 34-40, 2006.

- [27] K. Abdullah, S. SÜRÜCÜLER, and A. KİRİK, "Kesme Kuvvetlerinin Tahmini İçin Matematiksel Bir Model Geliştirme," *Politeknik Dergisi*, vol. 13, no. 1, pp. 15-20, 2010.
- [28] D. S. C. Kishore, K. P. Rao, and A. Ramesh, "Optimization of machining parameters for improving cutting force and surface roughness in turning of Al6061-TiC in-situ metal matrix composites by using Taguchi method," *Materials Today: Proceedings*, vol. 2, no. 4-5, pp. 3075-3083, 2015.
- [29] I. Hanafi, A. Khamlichi, F. M. Cabrera, P. J. N. López, and A. Jabbouri, "Fuzzy rule based predictive model for cutting force in turning of reinforced PEEK composite," *Measurement*, vol. 45, no. 6, pp. 1424-1435, 2012.
- [30] A. Salımlı and M. Rafoğlu, "Titreşim ve Kesme Kuvveti Esaslı Takım Aşınmasının Bulanık Mantıkla İzlenmesi ve Tahmini," *Politeknik Dergisi*, vol. 20, no. 1, pp. 111-120, 2017.
- [31] M. Kuntoğlu and H. Sağlam, "Investigation of progressive tool wear for determining of optimized machining parameters in turning," *Measurement*, vol. 140, pp. 427-436, 2019.
- [32] C. Fetecau and F. Stan, "Study of cutting force and surface roughness in the turning of polytetrafluoroethylene composites with a polycrystalline diamond tool," *Measurement*, vol. 45, no. 6, pp. 1367-1379, 2012.
- [33] D. S. C. Kishore, K. P. Rao, and A. Mahamani, "Investigation of cutting force, surface roughness and flank wear in turning of In-situ Al6061-TiC metal matrix composite," *Procedia materials science*, vol. 6, pp. 1040-1050, 2014.
- [34] Ş. Karabulut, "Optimization of surface roughness and cutting force during AA7039/Al₂O₃ metal matrix composites milling using neural networks and Taguchi method," *Measurement*, vol. 66, pp. 139-149, 2015.
- [35] A. Pugazhenti, G. Kanagaraj, I. Dinaharan, and J. D. R. Selvam, "Turning characteristics of in situ formed TiB₂ ceramic particulate reinforced AA7075 aluminum matrix composites using polycrystalline diamond cutting tool," *Measurement*, vol. 121, pp. 39-46, 2018.
- [36] A. Razavykia, S. Farahany, and N. M. Yusof, "Evaluation of cutting force and surface roughness in the dry turning of Al-Mg₂Si in-situ metal matrix composite inoculated with bismuth using DOE approach," *Measurement*, vol. 76, pp. 170-182, 2015.
- [37] C. Shoba, N. Ramanaiah, and D. N. Rao, "Effect of reinforcement on the cutting forces while machining metal matrix composites—an experimental approach," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 18, no. 4, pp. 658-663, 2015.
- [38] D. Srinivas, R. Kadavaramath, B. L. Shankar, P. Nagaraj, J. Bhaskaran, and D. Mallapur, "Optimization of Machinability Parameters of Al1100-B₄C Composites using Taguchi Method," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 10, pp. 11305-11313, 2017.
- [39] A. Aslan, A. Güneş, E. Salur, Ö. S. Şahin, H. B. Karadağ, and A. Akdemir, "Mechanical properties and microstructure of composites produced by recycling metal chips," *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 25, no. 9, pp. 1070-1079, 2018.

Effect of the Oscillator Length on the Characteristics of a Feedback Type Fluidic Oscillator

*¹Mehmet N. Tomac¹University of Cincinnati, Cincinnati, OH 45267, USA,tomac.1@buckeyemail.osu.edu, 

Research Paper

Arrival Date: 28.06.2019

Accepted Date: 27.01.2020

Abstract

This work characterizes the various length fluidic oscillators with constant depth and having the same main geometric dimensions. A change in fluidic oscillator's length affects the frequency and sweeping characteristics of the fluidic oscillators. These characteristics were extracted by means of constant temperature anemometry hot-wire measurements and water flow visualizations. A total number of ten fluidic oscillators were compared to the baseline fluidic oscillator design. It was observed that shortening the fluidic oscillator ceases the oscillations after a threshold oscillator length whereas elongating the fluidic oscillator decreases the frequency and sweep angle gradually. Furthermore, the frequency maps obtained from hot-wire measurements for each considered fluidic oscillator design provided overall detail about the frequency of the oscillations for a wide range of flow rate. For a constant supply flow rate where the frequency and the sweep angle of an oscillator is constant, changing the length of a fluidic oscillator will allow varying these characteristics of the oscillator. Thus the oscillator can be tailored for a specific need of an application.

Keywords: Experimental Fluid Mechanics, Aerodynamic Flow Control, Flow Control Actuators, Fluidic Oscillators

1. INTRODUCTION

Fluidic oscillators are useful devices that are capable of generating an oscillating jet by solely employing the fluid dynamics principles without any moving parts. They are one of the main outcomes of the field of fluidic logic of 1960s and a fluidic oscillator was first designed by Warren [1]. Since then the fluidic oscillators have been used in various applications. The most known application for the fluidic oscillators is their role as automobile windshield washer nozzles [2]. The spreading of the oscillating jet created by these devices are useful to spray windshield washer fluid to a larger area with minimal amount of fluid. Another main application for fluidic oscillators is the flow rate metering [3, 4] since the oscillation frequency of a fluidic oscillator is strictly dictated by the supply flow rate. However, recently fluidic oscillators have started attracting more attention to be used in various aerospace applications in order to obtain aerodynamic, aeroacoustics or aerothermal improvements. Fluidic oscillators have been used for noise reduction [5], combustion control [6], and separation control [7, 8] as the detailed reviews can be found in the literature [9, 10]. A recent flight test completed by Boeing [11] has shown that an array of fluid oscillators can delay the flow separation on an aircraft's tail, which would allow design of smaller tails thus results in reduced drag and improved

overall fuel economy. Although aerodynamic improvements have vital importance for air vehicles, it has also become very important for ground vehicles such as automobiles, trucks, and trains due to the strict regulations and competition. The automobiles move through air and face a force opposing their motion. This force is known as drag and it can be accounted for more than 60% of the power consumed by the vehicle especially at higher speeds at highway travel. Therefore, more studies are focusing on increasing aerodynamic efficiency of automobiles in order to decrease the fuel consumption of these vehicles. The traditional models that are studied for this purpose are known as Ahmed Body model [12] and Generic European Transport System (GETS) model [13]. Various passive and active flow control actuators were used on these models such as an array of small cylinders as vortex generators [14], pulsed jets [15], and fluidic oscillators [17, 18]. The drag reductions reported in these works were as high as 16%. For instance, Woszidlo et al. [17] used fluidic oscillators to control the separation behind a GETS model and reported drag reductions up to 16%. In another study, Metka and Gregory [18] used fluidic oscillators to control the separation behind an Ahmed Body model and reported drag reductions up to 7%. As these results indicate fluidic oscillators are promising flow control actuators for various aerodynamic applications including automobile aerodynamics. Therefore, characterization of the

*Corresponding author University of Cincinnati Department of Otolaryngology-Head and Neck Surgery, OH 45267, USA, tomac.1@buckeyemail.osu.edu, (+1) 614-778-9201

fluidic oscillators is important subject since various scale oscillators with various characteristics are needed for different applications.

The internal flow field of a fluidic oscillator has a key role in defining the characteristics of the device. Various studies discuss the internal flow fields of different type oscillators [19-24] and recent studies present new approaches to manipulate the internal and external flow fields of the oscillators [25,26] that can dynamically change the characteristics of the oscillators. The fluidic oscillator design used in this work is a feedback type fluidic oscillator and was based on a design by Bray [27] as the geometry of this design is given in Figure 1. As seen in the schematic, pressurized fluid feeds the main jet which is issued into an interaction chamber surrounded by two feedback channels. The main jet attaches to one of the nearby walls due to the Coandă effect. In the vicinity of the throat of the oscillator, the main jet bifurcates into two branches. The first branch leaves the oscillator and constitutes the exiting jet whereas the second branch generates a feedback flow in the feedback channel. This feedback flow enlarges a separation bubble and urges the main jet to attach to the other nearby wall. This process repeats itself as long as the oscillator is fed and continuously changes the flow direction of the exiting jet thus creating oscillating behavior.

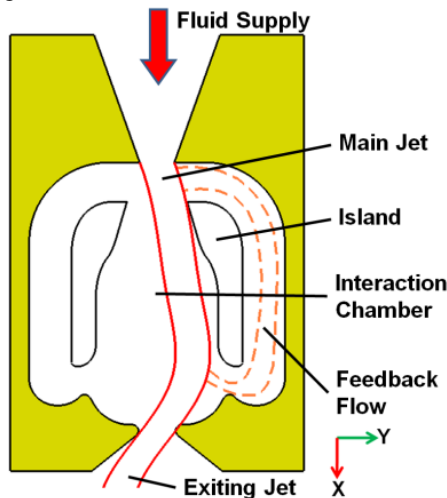


Figure 1. The outline of the fluidic oscillator geometry and the schematic of the internal flow field [27].

Various fluidic oscillator applications require various scale oscillator with different characteristics. In this work, effect of fluidic oscillator length on the frequency and sweep angle characteristics was investigated by means of hot-wire measurements and flow visualizations. The performance of the shortened or elongated designs was compared to a baseline design.

2. EXPERIMENTAL SETUPS

2.1. Design of the Fluidic Oscillators

Total of 11 fluidic oscillator designs were built by laser cutting out of acrylic material as one of the actual model is

presented in Figure 2a. Each experimental model was consisted of four pieces glued together with acrylic glue. The depth of the oscillators was fixed at 1.5 mm and the throat exit width was 3.5 mm resulting 2.1 mm of hydraulic diameter. Figure 2a and 2b show three of these 11 models built. D0 is the baseline design whereas -D4 is the shortest (10 mm shorter than D0) and +D6 is the longest design (40 mm longer than D0) that were considered. All 11 designs are shown over the longest +D6 design in Figure 2c. Each dashed green lines correspond to a shorter design whereas each dashed blue lines corresponds to a longer design and red dashed line is the D0 baseline design. Note that, next to each dashed line the name of the design and the physical length of the design compared to D0 baseline design are also provided.

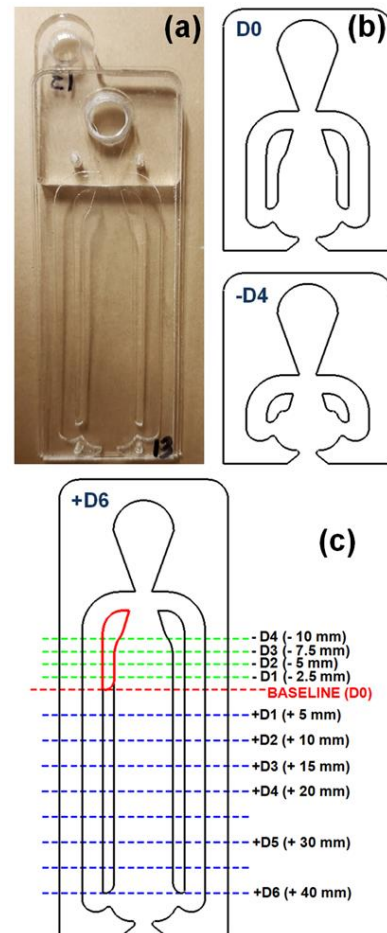


Figure 2. Photo of an actual experimental model for +D6 (a), the geometry of the baseline (D0) and the smallest -D4 designs (b), and schematic indicating the geometrical length of each design (c).

2.2. Frequency Measurements

In order to extract the frequency characteristics of each considered design a Constant Temperature Anemometry (CTA) system from A.A. Lab Systems (LTD AN-1005) was used. The hot-wire probe used for measurements was Dantec Dynamics Type 55R01 probe. This probe's sensor is made out of 70 μm diameter quartz fiber. It is 3 mm long and

covered by thin nickel coating (0.5 μm) to be used in air applications. The probe was located 10mm downstream and 2 mm off the centerline of the oscillator throat for each measurement as shown in Figure 3 for design +D3. The hot-wire probe was not calibrated since the power spectral characteristics of a signal can be accurately obtained from raw voltage data. Probe signal was sampled at 25.6 kHz which allows observation of frequencies up to 12.3 kHz due to the Nyquist Theorem. A mass flow controller (Alicat Scientific MCR-250SLPM-D/10M) was used to measure the mass flow rate through the oscillators. The uncertainty in the measured frequency was calculated to be $\pm 4\%$.



Figure 3. Location of the hot-wire probe relative to +D3 design.

2.3. Water Flow Visualizations

Water flow visualizations were used to visually monitor the changes in the sweep angle and to quantify the sweep angle of the each fluidic oscillator design. Fluidic oscillators were connected to city water and the flow rate was controlled with a needle valve. Reynolds number (Re) was matched in order to ensure similar flow fields between water flow visualizations and hot-wire measurements in air. Re was based on the exit width as the characteristic length and the bulk velocity calculated by using the volumetric flow rate measured by an Omega Engineering FLR1011ST-D flow meter. The highest flow rate of 50 SLPM chosen for air and the corresponding flow rate for water flow visualizations was 28.3 mL/s. A Sony DSC-TX30 waterproof digital camera was used to record the time-averaged images of the external flow field.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. Frequency Characteristics

The frequency characteristics for all designs were obtained from hot-wire measurements. Frequency maps were generated by using individual power spectrum for each design. Such power spectrum for baseline D0 design for flow rate of 60 SLPM is provided in Figure 4. The fundamental frequency (first harmonic) corresponding the oscillation frequency of the fluidic oscillator for this flow rate was 800 Hz. Also, harmonics up to fourth are visible in the power spectra. The frequency value corresponding to fourth harmonic was 3206 Hz. The magnitude of the signal was observed to diminish significantly for the higher harmonics.

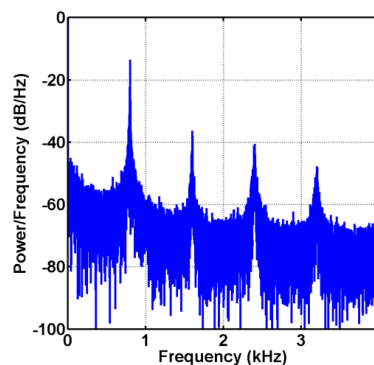


Figure 4. The power spectrum for the baseline D0 design at flow rate of 60 SLPM.

Figure 5 presents the frequency maps obtained for the baseline D0 design by combining the power spectra for each considered flow rate in the range from 10 SLPM to 60 SLPM. The first plot shows the frequency map for up to 4 kHz. In this figure, the fundamental frequencies (i.e., oscillation frequencies) are visible and higher harmonics are also observable. Higher harmonics up to sixth are visible in the plot for the flow rate of 40 SLPM. In Figure 5, the zoomed-in plot considers the oscillation frequencies observed below 1 kHz. As expected the oscillation frequency increases with the increasing flow rate. The dashed line in this figure follows the changes in the trend and it was seen to exhibit quasi-linear character.

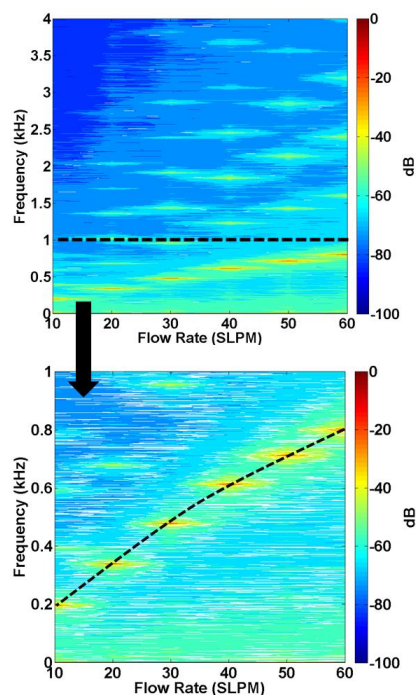


Figure 5. Frequency map for the baseline D0 design for flow rates from 10 SLPM to 60 SLPM.

Additional frequency maps for other designs were generated to observe the changes in the frequency characteristics for the considered flow rate range of 10 SLPM to 60 SLPM. Figure 6 and 7 present the frequency maps for the rest of the designs. As can be seen for -D4 and -D3, there is no

observable oscillation frequency i.e., the oscillator geometry is not capable of generating an oscillating jet for these lengths. However, design -D2 exhibits relatively higher magnitude frequencies than the two designs before it but these magnitudes were still in the lower end. On the other hand, -D1 design starts to show distinct oscillation frequencies for all flow rates. Even some higher harmonics also start to appear. Other designs starting with +D1 clearly

show the oscillation frequencies for the considered flow rate range. However, after the design +D1 the higher harmonics was tended to disappear for most of the flow rates. Note that, also after the design +D1 the dark blue contours indicating lower magnitude signal start to change color indicating the overall magnitudes of entire frequency range are increasing beside the fundamental oscillation frequencies.

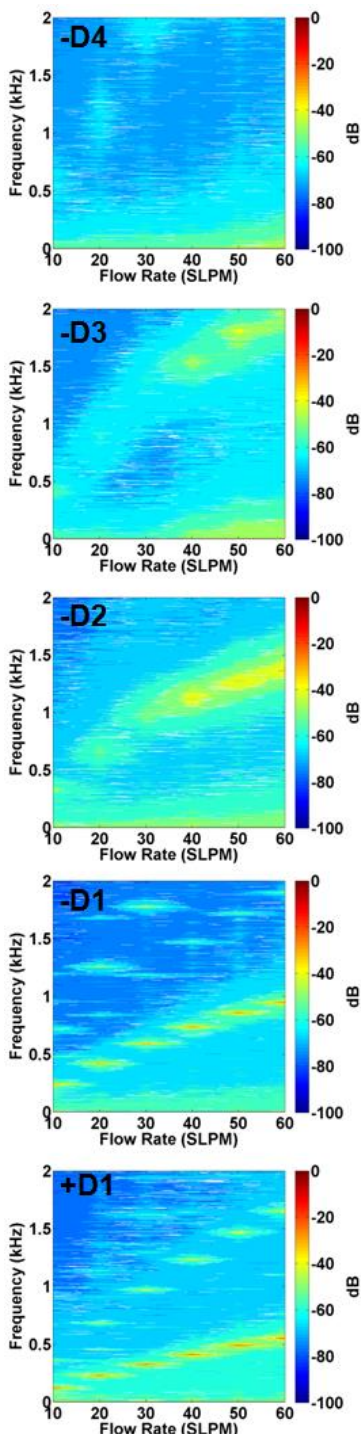


Figure 6. The frequency maps for designs -D4 to +D1 excluding D0 for a flow rate range from 10 SLPM to 60 SLPM.

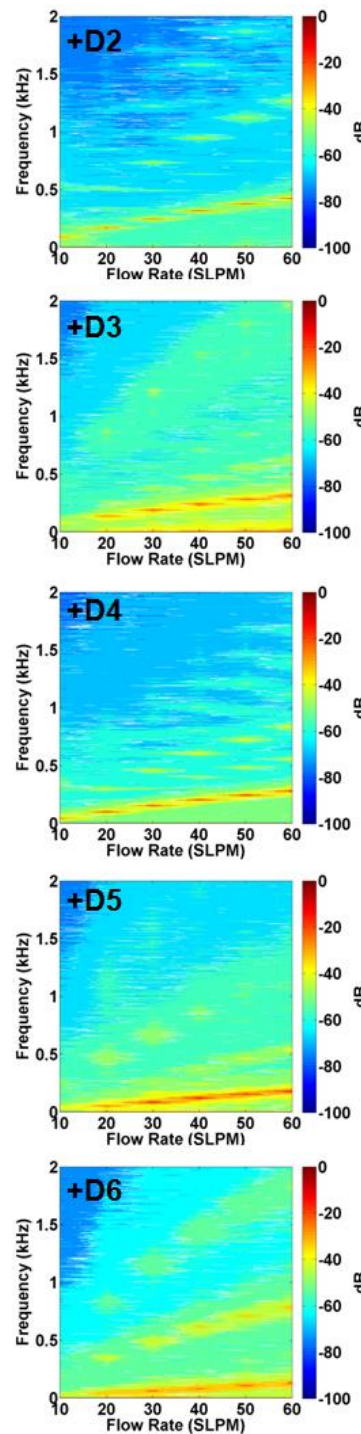


Figure 7. The frequency maps for designs +D2 to +D6 for a flow rate range from 10 SLPM to 60 SLPM.

Figure 8 was generated in order to isolate the fundamental oscillation frequencies from the frequency maps. In this figure, the oscillation frequency for each design is presented for the considered flow rate range. As seen in here, -D4 and -D3 yielded zero oscillations i.e., the device does not operate as an oscillator. However, starting with +D2 this trend changes and oscillator starts to provide an oscillating jet. As the length of the oscillator is increased oscillation frequencies start to decrease and the trend of the frequency change for a given design becomes more linear. For instance, it is possible to obtain 1371 Hz with -D2 whereas an oscillation frequency of 126 Hz is achievable with design +D6 that are considered in this work. Note that, for both designs and all designs the exit dimensions were fixed and only the length of the oscillator was varied. This also implies that the bulk velocity from each oscillator was constant for a given flow rate.

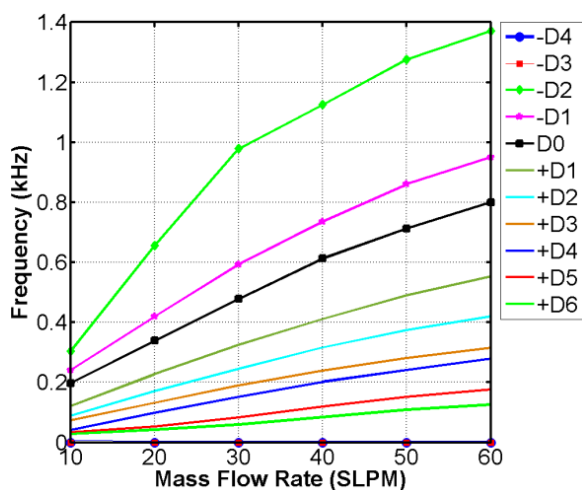


Figure 8. Comparison of the oscillations frequencies for all designs.

Frequency maps can also be generated to present the changes in the frequency based on the designs. Figure 9 shows these frequency maps. In here, for each plot the flow rate is constant and the oscillation frequencies are compared from one design to another. The nature of the change in the oscillation frequency with the increasing flow rate is rather parabolic than linear. Oscillation frequencies increase as the flow rate is increased as expected.

One of the main observations in here is the fact that when higher flow rates such as 50 SLPM and 60 SLPM are considered, the frequency maps indicate some oscillation frequencies for -D3. But for -D4 no high amplitude frequency can be observed. Furthermore, as the baseline D0 design is elongated up to 40 mm, the oscillation frequency becomes broader and this is clearly visible for designs +D4, +D5, and +D6 from 20 SLPM to 60 SLPM.

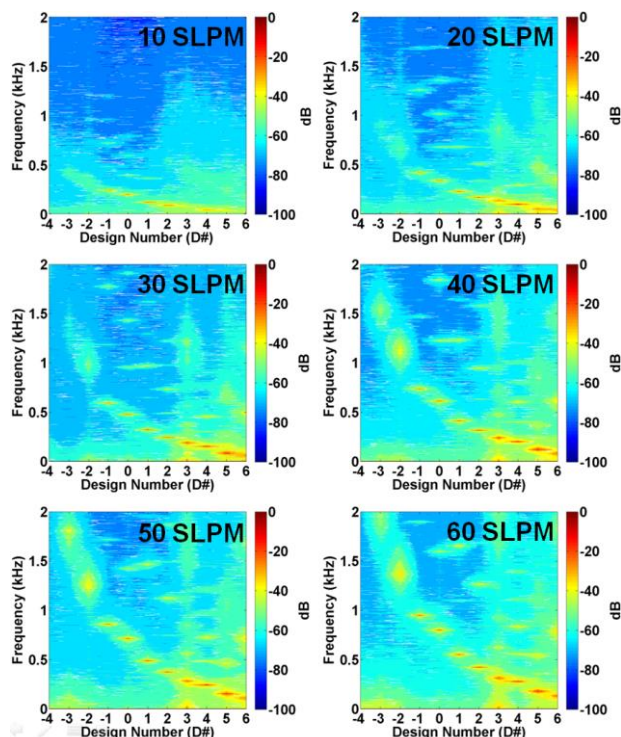


Figure 9. Change of frequency characteristics for all designs based on the selected flow rate.

3.2. Sweep Angle Characteristics

The two main components that constitute the characteristics of a fluidic oscillator are the oscillation frequency and the sweep angle. The oscillation frequencies for various length oscillators were measured by means of hot-wire measurements and sweep angles were obtained by Re matched flow visualizations. For this purpose, the flow rate of 50 SLPM chosen and the corresponding flow rate for water flow visualizations was 28.3 mL/s. Figure 10 shows such flow visualization for baseline D0 design. In this figure, the sweeping jet generated by the fluidic oscillator can easily be seen. From this visualization the sweep angle was measured to be 41° and this value was the highest of all considered designs.



Figure 10. Flow visualization for the baseline D0 design showing the sweep angle of the oscillating jet generated by the oscillator.

The flow visualizations also used to extract the sweep angle characteristics for the rest of the designs. Figure 11 details the sweep angle of the each oscillator design. As can be seen in the visualizations for -D4 and -D3, the sweeping motion cannot be identified. On the other hand, with design -D2 the sweeping motion becomes clear and measurable from the visualizations. After this design, the sweep angle increases up to 41° for the baseline D0 design and starts to reduce afterwards. The sweep angle goes down to 20° for the longest +D6 design.

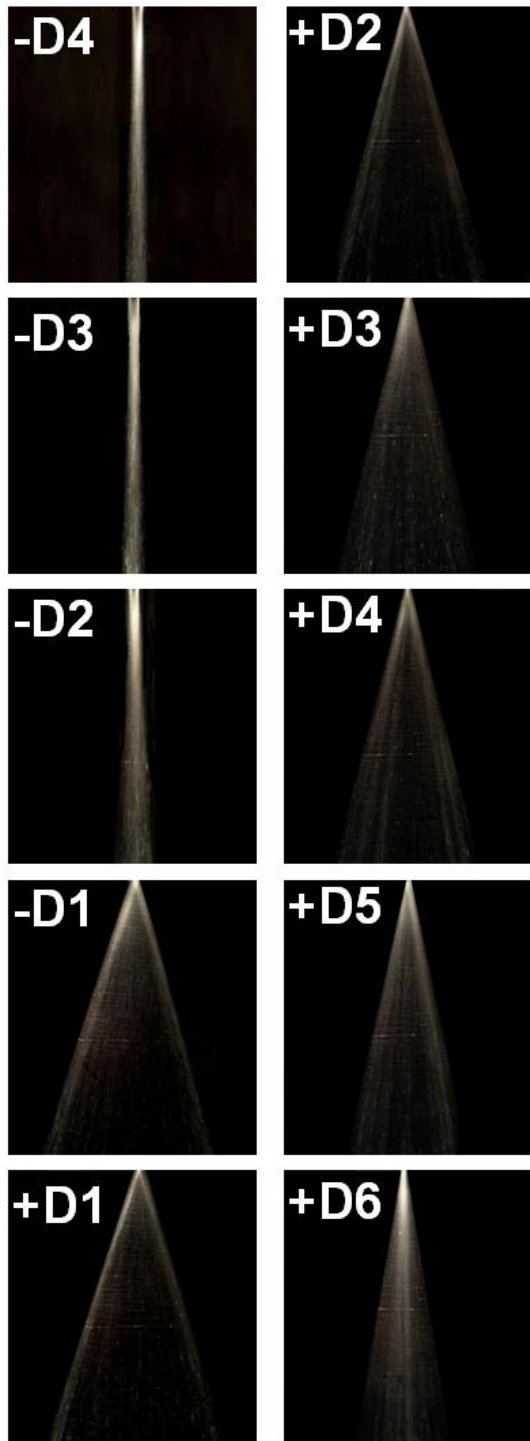


Figure 11. Water flow visualizations for all designs.

Table 1 summarizes the sweep angle for each design quantitatively. The measured sweep angle starts from 9° for -D2, goes up to 41° for the baseline D0 design, and goes down to 20° for the longest +D6 design. Therefore, when the exit dimensions are kept constant and the length of the oscillator is changed it is possible to vary the sweep angle from 9° to 41°.

Table 1. Measured sweep angles for all designs.

Design #	Sweep Angle (°)
-D4	NA
-D3	NA
-D2	9
-D1	37
D0	41
+D1	38
+D2	34
+D3	31
+D4	29
+D5	25
+D6	20

4. CONCLUSIONS

In this work, the fluidic oscillators having the same depth, throat width, and main geometrical dimensions but various oscillator lengths were characterized. The characterization was consisted of oscillation frequency and sweep angle measurements. The two shortest designs were not observed to generate oscillations. This fact also yielded an external flow field similar to that of regular jet for these two designs. The oscillation frequencies were observed to increase with the increasing flow rate for a given design. Furthermore, it was also seen that as the oscillator is elongated compared to the baseline design, both the oscillation frequency and the sweep angle reduce. However, when the oscillator is made shorter, the oscillation frequency increases while the sweep angle decreases. Furthermore, the oscillator can no longer sustain the oscillations after a certain length.

Existence of the oscillations were found to be more sensitive to shortening than elongating the oscillator. The oscillations were present when the oscillator was elongated by 40 mm but seemed to cease after shortening the oscillator by 5 mm. The data and the approach presented in this work can be used to select a fluidic oscillator with the characteristics that are specific to the application they are intended to be used for.

ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to thank Dr. Liran Oren of University of Cincinnati for providing access to the Constant Temperature Anemometry system. The experimental models used in this work was built by using an Accelerator Fast Track funding (Project No. 60065789) awarded by the Ohio State University Technology Commercialization Office.

REFERENCES

- [1]. R. W. Warren, U.S. Patent Application for "Fluid Oscillator," Docket No. 3,016,066, filed 9 Jan. 1962.
- [2]. R. D. Stouffer, "Liquid Oscillator Device," U.S. Patent 4,508,267, filed 2 Apr. 1985.
- [3]. T. Shakouchi, "Fluidic Oscillator Operated by Gas(Air)-Liquid(Water) Two-Phase Flow (Measurement of Flow Rate of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipe)," Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, Vol. 1, American Society of Mechanical Engineers, New York, pp. 895–901, 2001.
- [4]. H. Wang, S. B. M. Beck, G.H. Priestman, and R. F. Boucher, "Fluidic Pressure Pulse Transmitting Flowmeter," Chemical Engineering Research and Design: Transactions of the Institute of Chemical Engineers, Part A, Vol. 75, No. A4, pp. 381–391, 1997.
- [5]. G. Raman and S. Raghu, "Cavity Resonance Suppression Using Miniature Fluidic Oscillators," AIAA Journal Vol. 45, 2608–2612, 2004.
- [6]. D. Guyot, B. C. Bobusch, C. O. Paschereit, and S. Raghu, "Active Combustion Control Using a Fluidic Oscillator for Asymmetric Fuel Flow Modulation," 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA Paper 2008-4956, 2008.
- [7]. C. Cerretelli and K. Kirtley, "Boundary Layer Separation Control with Fluidic Oscillators," Journal of Turbomachinery, Vol. 131, No. 4, pp. 1-9, 2009.
- [8]. R. Seele, P. Tewes, R. Wozidlo, M. A. McVeigh, N. Lucas, and I. J. Wagnanski, "Discrete Sweeping Jets as Tools for Improving the Performance of the V-22," Journal of Aircraft, Vol. 46, No. 6, pp. 2098–2106, 2009.
- [9]. J. W. Gregory and M. N. Tomac, "A Review of Fluidic Oscillator Development," 43rd Fluid Dynamics Conference, AIAA Paper 2013-2474, 2013.
- [10]. S. Raghu, "Fluidic oscillators for flow control," Experiments in Fluids, Vol. 54, No.2, pp.1455, 2013.
- [11]. E. A. Whalen, A. Shmilovich, M. Spoor, J. Tran, P. Vijgen, J. C. Lin, and M. Andino, "Flight Test of an Active Flow Control Enhanced Vertical Tail," AIAA Journal Vol. 56, 3393–3398, 2018.
- [12]. S. R. Ahmed, G. Ramm, and G. Falin, G., "Some Salient Features of the Time Averaged Vehicle Wake," SAE Technical Paper No. 840300, 1984.
- [13]. G. M. R. van Raemdonck and M. J. L. van Tooren, "Time-Averaged Phenomenological Investigation of a Wake behind a Bluff Body". Proc. Bluff Body Aerodynamics & Applications VI, Milan, Italy, 2008.
- [14]. J.-F. Beaudoin and J.-L. Aider, "Drag and Lift Reduction of a 3D Bluff Body Using Flaps," Experiments in Fluids, Vol. 44, No.4, pp. 491–501, 2008.
- [15]. S. Krajnovic, "Large Eddy Simulation Exploration of Passive Flow Control around an Ahmed Body," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol.13, No.12, p. 121103, 2014.
- [16]. P. Joseph, X. Amandole`se, and J.-L. Aider, "Drag Reduction on the 25° Slant Angle Ahmed Reference Body Using Pulsed Jets," Experiments in Fluids, Vol. 52, No.5, pp. 1169–1185, 2012.
- [17]. R. Wozidlo, T. Stumper, C. Nayeri, and C. O. Paschereit, "Experimental study on bluff body drag reduction with fluidic oscillators," 52nd Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 2014-0403, 2014.
- [18]. M. Metka and J.W. Gregory, "Drag reduction on the 25-deg Ahmed model using fluidic oscillators," Journal of Fluids Engineering, Vol. 13, No.5, p.051108, 2015.
- [19]. B. C. Bobusch, R. Wozidlo, J. M. Bergada, C. N. Nayeri, and C. O. Paschereit, "Experimental study of the internal flow structures inside a fluidic oscillator," Experiments in Fluids, Vol. 54, No.6, p.1559, 2013.
- [20]. R. Wozidlo, F. Ostermann, C. N. Nayeri, and C. O. Paschereit, "The time-resolved natural flow field of a fluidic oscillator," Experiments in Fluids, Vol. 56, No.6, p. 125, 2015.
- [21]. M. Sieber, F. Ostermann, R. Wozidlo, K. Oberleithner, and C. O. Paschereit, "Lagrangian coherent structures in the flow field of a fluidic oscillator," Physical Review Fluids, Vol. 1, No. 5, p. 050509, 2016.
- [22]. M. N. Tomac and J. W. Gregory, "Internal Jet Interactions in a Fluidic Oscillator at Low Flow Rate," Experiments in Fluids, Vol. 55, No.5, p. 1730, 2014.
- [23]. M. N. Tomac and J. W. Gregory, "Internal Flow Physics of a Fluidic Oscillator Spray in the Transition Regime," Atomization and Sprays, Vol. 26, No.7, 2016.
- [24]. M. N. Tomac and J. W. Gregory, "Oscillation Characteristics of Mutually Impinging Dual Jets in a Mixing Chamber," Physics of Fluids, Vol. 30, No. 11, p. 117102, 2018.
- [25]. M. N. Tomac and J. W. Gregory, "Phase-Synchronized Fluidic Oscillator Pair," AIAA Journal, Vol. 57, No. 2, pp. 670 - 681, 2019.
- [26]. M. N. Tomac and E. Sundström, "Adjustable Frequency Fluidic Oscillator with Supermode Frequency," AIAA Journal, Vol. 57, No.8, pp. 3349 - 3359, 2019.
- [27]. H. C. Bray, "Cold Weather Fluidic Fan Spray Devices and Method," U.S. Patent 4463904, 1984.

Yapım Firmalarının Kurumsal Risk Yönetimi Olgunluğunda Risk Yöneticisinin Rolü

*¹ Tuğçe Ercan, ²Kübra Arı
¹YTÜ Mimarlık Fakültesi, tugcesim@yahoo.com
²YTÜ Mimarlık Fakültesi, kubra.ari2@gmail.com

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 18.06.2019

Kabul Tarihi: 17.02.2020

Öz

Risk yönetim sürecini bütüncül bir yaklaşımla ele alan kurumsal risk yönetimi (KRY), verimli iş süreçlerinin yürütülmesine olanak sağlamaktadır. Sürekli olarak gelişen yapım sektöründe, karmaşık hale gelen projeler için süre, maliyet ve kalite faktörlerinde başarıya ulaşmak sistemli ve bütünsel yönetim yaklaşımlarını gerekli kılmaktadır. Yapım projelerinin yönetim sürecinde, olası riskleri bütünsel bir bakış açısıyla yönetebilmek, yapım projelerinin başarı ve verimliliği açısından kritik önem taşımaktadır. Ancak yapım sektöründe faaliyet gösteren firmalarda, proje düzeyinde risk yönetiminden kurumsal risk yönetimine geçiş adımları atılmaya yeni yeni başlanmıştır ve henüz yeterli olgunluk seviyesine ulaşamamıştır.

Bu bağlamda bu çalışmanın temel amacı, risk yöneticisinin varlığının ve KRY yapılaşmasının yapım firmalarının kurumsal risk yönetimi olgunluk düzeyine olan etkisini ortaya koymaktır. Bu amaçla, yapılan kapsamlı literatür taraması sonucunda elde edilen altı temel faktör (yönetim kurulu ve üst düzey yönetimin kararlılığı, kurumsal risk yönetimine sahip olma, risk tanımlama, analiz ve tepkisi, kurumsal risk yönetiminin iş süreçlerine entegre edilmesi, hedeflerin belirlenmesi ve yeterli kaynaklar) baz alınarak bir anket alan çalışması düzenlenmiştir. Veriler, betimsel istatistikler ve ANOVA analizi yöntemleriyle irdelenmiştir. Yürütülen çalışma sonucunda risk yöneticisi varlığının yapım firmalarında kurumsal risk yönetimi olgunluk düzeyine olan etkisi ve temel faktörlerin KRY olgunluğuna olan etki ve önem dereceleri belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, yapım firmalarında KRY olgunluk düzeylerine ilişkin kavramsal çerçeveyi irdelerek, yapılacak gelecek çalışmalara ışık tutmuştur.

Anahtar Kelimeler: yapım yönetimi, kurumsal risk yönetimi, kurumsal risk yönetimi olgunluğu, risk yöneticisi.

The Role of the Risk Manager in Enterprise Risk Management Maturity Level of Construction Companies

*¹ Tuğçe Ercan, ²Kübra Arı
¹YTÜ Mimarlık Fakültesi, tugcesim@yahoo.com
²YTÜ Mimarlık Fakültesi, kubra.ari2@gmail.com

Abstract

Addressing the risk management process with a holistic approach, enterprise risk management (ERM) enables efficient business processes to be carried out. Achieving success in time, cost and quality factors for complex projects in the constantly evolving construction industry requires systematic and holistic management approaches. In the management process of the construction projects, managing the possible risks from a holistic perspective is critical to the success and efficiency of the construction projects. However, in the companies operating in the construction sector, the transition steps from project-level risk management to corporate risk management have just begun and the level of maturity has not yet been reached.

In this context, the main purpose of this study is to reveal the effect of the existence of the risk manager and corporate risk management structuring on the corporate risk management maturity level of the construction companies. For this purpose, six main factors (stability of the board and senior management, having corporate risk management, risk identification, analysis and response, integrating corporate risk management into business processes, setting targets, and sufficient resources) are obtained as a result of a comprehensive literature review and a survey field study was organized. The data were analyzed with descriptive

*¹Sorumlu yazar adres, mail ve telefon bilgileri (sadece ilk sayfada olacaktır) / Corresponding author address, mail and telephone (only on the first page)

statistics and ANOVA analysis methods. As a result of the study carried out, the effect of the presence of the risk manager on the maturity level of corporate risk management in the construction companies and the impact and importance levels of the basic factors on the maturity of ERM were determined and compared. This study shed light on future studies to be done by examining the conceptual framework regarding ERM maturity levels in production companies.

Keywords: construction management, enterprise risk management (ERM), enterprise risk management maturity, risk manager.

1. GİRİŞ

Kurumsal risk yönetimi (KRY) ile ilgili 1995 yılından bu yana yapılan tanımlamalarda KRY'nin risk analiz süreçlerindeki etkisine, stratejik amaç ve hedeflere ulaşmadaki rolüne, maliyet planlamaları ile firma ve paydaş değerleri üzerindeki etkisine ve bütüncül bir yaklaşım oluşuna vurgu yapılmıştır. Tüm tanımlar arasından COSO (*Committee of Sponsoring Organizations*) modelinin tanımı en kapsamlı KRY tanımı olarak nitelendirilebilir, bu tanıma göre KRY:

'bir kuruluşun üst yöneticilerinden ve çalışanlarından etkilenen, kurumsal bir stratejiyle uygulanan, kuruluşu etkileyebilecek potansiyel olayları tanımlama için tasarlanan, risk alabilme sınırları ölçüsünde riskleri yöneten ve kuruluşun hedeflerine ulaşma başarısını gözeterek makul güvence sağlayan süreçtir.' [1].

Son zamanlarda terkedilen bir yaklaşım olan geleneksel risk yönetimi, firmayı risklerin ters etkilerinden korumayı amaçlamaktadır. Buna karşın KRY ise, firmanın genel stratejisinin bir parçası olur, firmanın riske dayalı karar mekanizmalarını özümsemesini sağlar ve piyasa değerini artırarak risk yönetim sürecini gerçekleştirir. Ayrıca, risklerin kategorize edilerek ele alındığı geleneksel risk yönetiminin aksine KRY, çeşitlilik içeren riskleri entegre ederek bütüncül bir şekilde ele alır ve süreçlere entegre eder. COSO (2004) tarafından oluşturulan KRY çerçevesinde KRY temel unsurları olan iç çevre, hedeflerin belirlenmesi, olay tanımlaması, risk değerlendirmesi, risk tepkisi, kontrol faaliyetleri, bilgi ile iletişim ve gözlemeleme unsurları KRY sürecini özetleyen basamaklardır [1].

KRY sürecinde, KRY'nin sunduğu bütüncül yaklaşımla, riskler tanımlanır, risk toleransı göz önüne alınarak uygun tepkiler üzerine yoğunlaşılır, karar verme mekanizmaları iyileşir ve firma içindeki tüm birimlerde genel bir risk yönetimi farkındalığı oluşturulur [2]. Bir diğer yandan, KRY uygulamalarının proje süreçlerine ve firma faaliyetlerine etkilerinin de belirli aralıklarla ölçülmesi ve kontrol edilmesi gerekmektedir.

Zaman, maliyet ve kalite yönetim süreçlerini içeren karmaşık bir planlama ağına sahip yapım projelerinin döngüsü içinde yapım firmalarının risklerle karşılaşması kaçınılmazdır. Bu planlamaların istenilen düzeyde ilerlemesi için yapılan risk yönetim faaliyetleri çoğu firma tarafından proje düzeyinde ele alınmaktadır [3]. Ancak proje düzeyinde kalan geleneksel risk yönetim süreçleri değişen piyasa koşullarında önemli noktaların gözden kaçırılmasına [4], zaman, maliyet ve kalite kayıplarına sebep olarak proje

süreçlerine zarar vermektedir. Bu yüzden yapım firmalarında risk yönetim süreçlerinin sadece proje düzeyinde değil, kurumsal anlamda örgütün her alanına yayılan, daha bütüncül yaklaşım olan KRY ile yönetilmesi sürdürülebilir firma performansı için bir gerekliliktir [5].

Farklı risk gruplarıyla yüzleşmenin olası olduğu yapım sektöründe KRY konusunda yapılan çalışmaların sayısının sınırlı olması ve yapım sektöründeki firmalarının KRY olgunluk düzeylerinin incelenmesinin ve bu konudaki eksikliklerinin saptanması noktasında bir farkındalık oluşturması bu çalışmanın temel amacıdır.

Bu çalışmanın temel hipotezi ise, etkili KRY süreçleri için gerekli bir etmen olan risk yöneticisinin varlığının yapım firmalarının KRY olgunluk düzeyine de olumlu etki edeceğidir. Bu bağlamda bu çalışma 6 anahtar KRY faktörü ve anahtar faktörlerin 16 alt parametresi ele alınarak belirlenecek KRY olgunluk düzeyine risk yöneticisinin varlığının etkisini incelemek amaçındadır. Bir diğer yandan, KRY yapılaşma düzeyleri, KRY olgunluğu ve risk yöneticisinin varlığıyla ilişkileri de incelenerek KRY olgunluğuna etkisinde öne çıkan faktörler ve parametreler araştırılacaktır.

2. RİSK YÖNETİMİNE YENİ BİR PERSPEKTİF: KURUMSAL RİSK YÖNETİMİ(KRY)

2.1. Kurumsal Risk Yönetimi Yaklaşımı

Literatürdeki birçok çalışma, kurumların stratejik hedeflerine ulaşması, risklerin analizi, ölçülmesi ve tepki verilmesi, tehditlerin değerlendirilmesi ve yeterli risk iştahı içinde olarak fırsatlardan yararlanılması, şirket değerinin artması, maliyet/fayda analizlerinde KRY'nin rolüne vurgu yapmaktadır. Literatürdeki KRY tanımlarında ise bütüncül bir yaklaşım oluşuna sıklıkla değinilmiştir, bunun yanı sıra KRY'nin iş süreçlerine etki ediş şekilleri ve potansiyel faydalarına odaklanan çalışmalar da dikkat çekmektedir. Literatürdeki KRY tanımlamalarını dört temel başlık içinde ele almak uygun olacaktır.

2.1.1. KRY'nin risk analiz süreçlerindeki etkisi üzerinden tanımlanması

Holton (1996), KRY'yi risklerin analiz sürecini optimize etmekle ilgili bulurken [6], Deragon (2000) KRY'yi varyasyonları en aza indirmek, doğuştan gelen riskleri azaltmak ve pozitif sinerjileri artırmak için sistematik ilişkileri yönetmeyi amaçlayan bir yaklaşım olarak tanımlamaktadır [7]. ISO 9001 standartlarında bir organizasyonu riskle ilgili yönlendirmek ve kontrol etmek

için gerçekleştirilen koordineli faaliyetler olarak tanımlanan risk yönetimi, 'Risk and Insurance Management Society' ise örgüt hedeflerinin öncelikli olarak ele alınmasını vurgulayarak, risk tabanlı çerçevesinde oluşturulan risk portföyünü hedeflere ulaşmada bir destek sistemi olarak yöneten stratejik bir iş disiplini olduğu belirtilmektedir.

2.1.2 KRY'nin stratejik amaç ve hedeflere ulaşmadaki rolü üzerinden tanımlanması

Banham (1999), KRY'nin hedefinin firma faaliyetlerinden kaynaklanan riskleri tanımlamak, analiz etmek, ölçmek ve karşılaştırmak olduğunu belirtirken [8], Miccolis (2000) KRY'yi stratejik hedeflere ulaşılmasını tehdit eden riskleri değerlendiren titiz bir yaklaşım olarak tanımlamaktadır [9]. IIA (2001) ise daha genel bir tanımlama yaparak, bir organizasyonun stratejik ve finansal hedeflerinin başarısını etkileyen girişimci ve yönetsel yaklaşımın kurumsal risk yönetimi olduğunu savunmaktadır [10].

2.1.3. KRY'nin maliyet planlamaları, firma ve paydaş değerleri üzerindeki etkisi üzerinden tanımlanması

Firmaların finansal raporlarında KRY'nin firma ve paydaş değerleri üzerinde etkisi, literatürdeki KRY tanımlamalarında yer edinmiştir. KRY, stratejiyi, süreçleri, insanları, teknoloji ve bilgiyi bir araya getirerek bütüncül ve ileriye dönük bir yaklaşım çerçevesinde işletmenin değerini yükselten bir yaklaşımken, Tillinghast Perrin'e (2001) göre KRY, risklerin tehdit ve fırsat olarak algılanarak değerlendirilip ticari amaçların gerçekleştirilmesine yön veren bir sistemdir [11]. D'archy ve Brogan (2001) ise ticari amaçları biraz daha özelleştirerek organizasyonların paydaşlarına değer katmak amacıyla riskleri tespit etme, kontrol etme, finanse etme ve gözlemlene sürecini KRY olarak tanımlamaktadır [12].

2.1.4. KRY'nin bütüncül bir yaklaşım oluşu üzerinden tanımlanması

Organizasyonların risklerinin yönetilmesinde rol alan KRY'nin bütüncül yaklaşımı, Dickinson [13], Harrington [14], Barton [15] ve Liebenberg ve Hoyt'un [16] KRY kavramlarında değinilen nokta olmuştur. Silo yaklaşımının tersine bütünleşmiş ve tanımlanmış, sürekli ve kapsamlı, sistematik ve entegre edilmiş, daha saldırgan ve stratejik KRY'yi tanımlamada kullanılan anahtar kelimeler olmuştur.

2.2. Geleneksel Risk Yönetiminden Kurumsal Risk Yönetimine Geçiş

21. yüzyıldan itibaren finansal kuruluş ve ortaklıklarda KRY anlayışına verilen destek ve KRY kullanıcıların sayısı artmıştır. Özellikle küresel kriz dönemlerinde risklerin düzgün tanımlanması, analizi ve yönetimine olanak sağlayan KRY anlayışı önem kazanmış, dünya çapında pek çok kuruluş başarısızlık ya da finansal zorluk dönemlerine girişi, düzenli bir risk yönetim sistemine sahip olmadıklarına bağlanmıştır [17].

Geleneksel risk yönetimi firmayı risklerin ters etkilerinden korumayı amaçlarken, KRY firmanın genel stratejisinin bir parçası olur ve firmaların riske dayalı karar mekanizmalarını özümseten bir yaklaşımla, firma hisselerinin de değer kazanarak risk yönetim sürecini gerçekleştirir.

Tablo 1 Geleneksel Risk Yönetimi ve Kurumsal Risk Yönetimi Özellikleri [31]

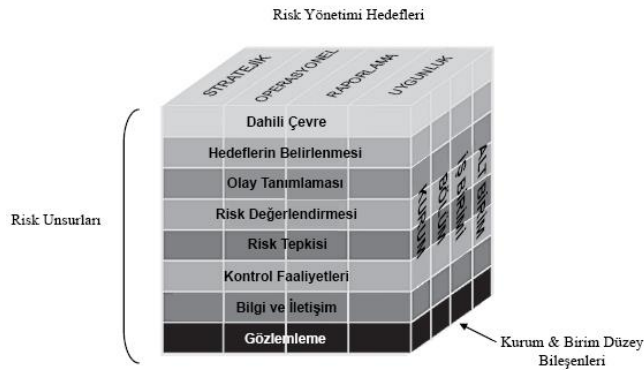
GELENEKSEL RİSK YÖNETİMİ	KURUMSAL RİSK YÖNETİMİ
Zayıf yapılaşma, merkezileşme ve resmileşme	Güçlü yapılaşma, merkezileşme ve resmileşme
Ayrık risk kategorilerinin oluşturulması	Bütüncül risk kategorilerinin oluşturulması
Risklerin tanımı, analizi ve tepkisinin ayrı fonksiyon ve departmanlara yönelik gerçekleştirilmesi	Risklerin tanımı, analizi ve tepkisinin organizasyon geneline yönelik gerçekleştirilmesi
Silo-tabanlı perspektif	Bütüncül perspektif ve entegrasyon
Kötü finans senaryolarına karşı savunmacı/ korumacı tavrıda bulunma	Riski minimize etmenin yanı sıra potansiyel fırsatları girişimci tavrıda bulunma

Tablo 1'de geleneksel risk yönetimi ile kurumsal risk yönetimi anlayışlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Geleneksel risk yönetimi yapılaşma, merkezileşme ve resmileşme anlamında zayıf kalırken, KRY'de güçlü yapılaşma, merkezileşmiş ve resmileşmiş bir çerçeve vardır [31]. Silo tabanlı, departmanlara yönelik risklerin kategorize edilmesi, tanımı, analizi ve tepkisinin verildiği bir yaklaşım olan geleneksel risk yönetimin aksine, KRY organizasyon geneline yönelik bütüncül bir risk yönetim süreci önerir. Geleneksel risk yönetiminde risklerle karşılaşıldığında bürünülen savunmacı ve korumacı tavır, kötü finans senaryolarına ve sonuçlarına sebebiyet verirken, KRY süreçlerinde riskler minimize edilerek ve sadece tehdit olarak algılanmayıp potansiyel fırsatlar olarak değerlendirilerek yönetilir.

2.3 Kurumsal Risk Yönetimi (KRY) İşleyişi

KRY'nin firmalarda adaptasyonu ve işleyişi, yasalara uygunluk ve kurumsal yönetim gerekliliklerini şart koşmaktadır [18]. Amerika Birleşik Devletleri'nde bu gerekliliklerin kurallarını düzenleyen New York *Stock Exchange* ve Sarbanes- Oxley Act gibi kuruluşların yanında zorunlu olmayan raporları ve yönetim pratiklerini kıyaslama ve halkın baskısıyla oluşturulmuş standartlar COSO KRY çerçevesinde bir araya getirilmiştir [19].

Şekil 1'de COSO'nun KRY çerçevesi yer almaktadır. COSO'nun KRY çerçevesi; risk unsurları, kurum içindeki birim bileşenleri ve kurumun stratejik amaç ve hedefleri olmak üzere üç boyuta sahiptir. Dahili çevre, hedeflerin belirlenmesi, risk değerlendirmesi, risk tepkisi, kontrol faaliyetleri, bilgi ve iletişim ve gözlemlene ise KRY'nin temel unsurları olarak yatay sütunda yer almaktadır.



Şekil 1 COSO Kurumsal Risk Yönetimi (KRY) Çerçevesi

Kurum içindeki birim bileşenlerinin sayısı kurumların organizasyonel yapısına göre değişmekte olup, risk yönetimi hedefleri de kurumların stratejik amaç ve hedeflerine göre şekillenerek KRY çerçevesinde yerlerini almaktadır.

Yasa ve yönetmelikler, tüm bir endüstri için asgari standartları oluşturmak için tasarlanmış kült araçlardır, ancak her zaman en iyi uygulamaları temsil etmemektedir. Yasa ve yönetmeliklere uyum, herhangi bir risk yönetim programında önemli bir hedefdir, ancak bunun KRY başarısı için gerekli ancak yetersiz bir koşul olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Gelişmiş KRY süreçleri platformunu oluşturan 4 gereksinim vardır [20].

Birincisi, stratejik hedeflerin ve organizasyonun gerektirdiği aktivitelerin gerçekleşmesine yönelik bir risk yönetim planı olmalıdır [20].

İkincisi, risk yönetim süreçlerini destekleyen ve yön veren kaynakların tanımlanması ve gerekli kaynakların tedarik edilmesi, sorumlu ve otoritelerin görev tanımlarının yapılması, üst yönetimin kararlılığının ana hatlarını çizen bir planlama ve kaynak varlığı gereklidir.

Üçüncüsü, risk yönetim programlarının uygulamasını içeren süreçler belirtilmelidir.

Dördüncüsü ise, risk yönetim programlarının uygunluğunun ve verimliliğinin değerlendirilebilmesi için yönetimce ve periyodik olarak gözden geçirilmesi bir rutin haline getirilmelidir [20].

Kurumsal risk yönetiminin gerekliliklerinin sağlandığı durumlarda bile uygulamaya geçmek kolay değildir. Kurumsal risk yönetimi, uygulamalarında esnek örgütsel yapı büyük önem taşımaktadır, KRY anlayışının firma tarafından benimsenmesi önemlidir. Üst düzey yöneticilerin risk yönetimi uygulamalarını desteklemesi, bir risk yönetimi planı geliştirmesi, yeterli risk yönetimi bilgi düzeyine sahip olması KRY anlayışının yerleşmesini kolaylaştırır [21].

Teknolojinin gelişmesi, fazla miktarda hesaplama gücü gerektiren kurumsal risk yönetimi için önemli bir dış anahtar etmen olmuştur. Gelişen teknoloji aracılığıyla, risklere, risklerin olasılıklarına, kesinlik derecelerine göre risklere, risklerin doğru ölçümüne ve risklerin birbirine bağlılık durumlarına ulaşılabilmektedir.

Başarılı kurumsal risk yönetimi programları, gelişmiş finansal stabilite, gelişmiş karar verme mekanizması, artan sorumluluk yönetimi, rekabet avantajı, kaynakların verimli kullanımı ve projelerin kontrolünde gelişmişlik sağlar [22].

3. Yapım Sektöründe Kurumsal Risk Yönetimi (KRY): Literatür Taraması

Yapım sektörü, içerdiği riskler bakımından, proje düzeyinde değil daha bütüncül bir risk yönetim yaklaşımına ihtiyaç duyar. Bu ihtiyaç doğrultusunda yapım firmaları, kurumsal risk yönetimi adaptasyon sürecinde olması gereken birincil sektördür.

Tablo 2 Yapım Sektöründe KRY Alanında Yapılan Çalışmalar

YAZAR	TARİH	KONU	YÖNTE M
Zhao, Hwang ve Low	2013	KRY kritik başarı faktörleri	Nicel
Zhao, Hwang ve Low	2013	Bulanık KRY Olgunluk Modeli Geliştirme	Nicel
Zhao, Hwang ve Low	2014	KRY Uygulamaları	Nicel
Zhao	2014	KRY Olgunluğunu İnceleme	Nicel
Salawu ve Fadhlin	2015	Risk yönetimi olgunluğunu değerlendirme	Nicel
Serpell vd.	2015	Yapım firmalarında risk yönetimi pratiklerini inceleme	Nitel
Zhao vd.	2015	KRY Etmenleri ve engelleri	Nicel
Zhao, Hwang ve Low	2016	KRY bilgi tabanlı karar destek sistemi	Nitel
Renault, Agumba ve Balogun	2016	KRY etmen ve zorlukları	Nitel
Zhao ve Singhaputtangkul,	2016	Firma Karakterinin KRY Üzerindeki Etkisi	Nicel
Caiado vd.	2016	Risk Yönetimi Olgunluğu Rehberi	Nitel
Mazlina ve Amirah	2016	KRY Uygulamaları	Nitel
Renault, Agumba ve Ansary	2016	KRY Süreçleri üzerine Bir Değerlendirilme	Nitel
Wibowo ve Taufik	2017	Kamu İnşaat Projelerinin Müşteri Organizasyonları için Bir Öz Değerlendirme Risk Yönetimi Olgunluk Modeli Geliştirilmesi	Nicel

Son zamanlarda kurumsal risk yönetimi anlayışının yayılmakta olduğu bir sektör olan yapım sektörü, bu alanda yapılan çalışmaların sayısının arttığı bir sektör olmuştur. Literatürde KRY'nin zorluk ve kolaylıklarının anlaşılmasını

sağlayan, KRY başarı faktörlerini, uygulanma ve olgunluk düzeylerini ortaya koyan çalışmalar yapılmıştır (Tablo 2).

Yapım sektöründe KRY alanındaki çalışmalar, konu olarak KRY olgunluğu, KRY uygulamaları, KRY etmen ve zorlukları ve modeller geliştirerek gerçekleştirilmiştir.

Salawu ve Abdullah tarafından 2015 yılında Nijerya'daki federal otoyol yapımı yüklenici firmalarının risk yönetim kabiliyetlerini ölçmeye yönelik yapılan araştırmada müteahhitlerin risk yönetim kabiliyet düzeyinin henüz olgunlaşmamış olduğu sonucuna varılmıştır.

Serpell vd. (2015) ise inşaat firmalarında risk yönetimi hakkında bilgi yetersizliği olduğunu öne sürmüşlerdir. Bilgi eksikliği konusunda bir farkındalık yaratmanın ve risk yönetimi konusundaki boşlukları tespit etmenin ve geliştirilmesinin ancak risk yönetimi konusundaki bilgi yönetimini her projede sistematik bir şekilde gerçekleştirerek mümkün olacağı vurgusu yapılmıştır [23].

Yapım firmalarında son yıllarda artan KRY konulu araştırmalar, KRY uygulamalarını inceleme, KRY olgunluğu analizi yapma, KRY olgunluk analizleri üzerinden öne çıkan faktörleri belirlemeye yönelik olmuştur. Çalışmaların bir kısmında da modeller üretilip, modeller üzerinden çıkarımlar yapılmıştır. Yapılan araştırmaların sonuçlarına göre yapım sektöründe KRY anlayışının yeni yeni yerleştiği, henüz yeterli olgunluğa ulaşmadığı ve bilgi eksikliklerinin mevcut olduğu belirlenmiştir.

4. Yapım Sektöründe Kurumsal Risk Yönetimi Olgunluğu

Kurumsal risk yönetimi olgunluğu (*Enterprise Risk Management Maturity*), kurumsal risk yönetimi uygulamalarının kapsamlılığını yansıtarak, değerlendirme sürecinde uygulamanın güçlü ve zayıf yönlerini meydana çıkararak, ele alınması gereken zayıf noktaların iyileştirilmesi konusunda yönetici ekibe yol gösteren bir yaklaşımdır [24]. Ağırlıklı olarak bankacılık, finans ve sigorta gibi sektörlerde rastladığımız KRY anlayışı yapım sektöründe faaliyet gösteren firmalarda yeni yerleşmeye başlayan bir anlayıştır. Oysaki, birden fazla disiplinle birlikte yürütülen çok paydaşlı bir süreç olarak inşaat projelerinin KRY adaptasyonu konusunda öncül olması beklenmektedir [22]. Yapım sektöründeki karmaşık iş süreçlerinin etkili ve verimli bir şekilde yürütülmesi için olgun ve tam yapılaşmış KRY sistemi önemli bir gereklilik haline gelmiştir. Ancak yapılan çalışmalar incelendiğinde yapım firmalarında KRY olgunluğu ve KRY bilgi düzeylerinin düşük olduğu görülmektedir [23].

4.1 Kurumsal Risk Yönetimi Olgunluk Modelleri ve KRY Olgunluğu Alanında Yapılan Çalışmalar

Kurumsal risk yönetimi (KRY) konusunda diğer sektörlerde pek çok çalışma yapılmasına rağmen inşaat sektöründe bu

sayı çok azdır. Literatürden farklı sektörlerde kurumsal risk yönetimi konusunda yapılan çalışmalar üzerinden yapım sektörüne yönelik KRY olgunluk modelleri geliştirildiği anlaşılmaktadır. Bu çalışmalar vaka analizleri yapılarak, modeller üzerinde çalışılarak gerçekleştirilmiş ve olgunluk düzeyine etki eden faktörler öne çıkarılmıştır.

Yapım firmalarında yeni tercih edilmeye başlanan kurumsal risk yönetimi yaklaşımının, ana çerçeve olarak henüz tamamlanmamış olduğu yapılan çalışmaların sonuçlarından biridir. Malezya'da yapılan bir vaka çalışmasına göre ele alınan 18 inşaat firmasının henüz 9 tanesinin tam olarak kurumsal risk yönetimi yaklaşımını benimsediği ve uygulamaya koyduğu görülmektedir [2].

Goyannes ve Caiado (2016) çalışmasında yapım firmalarında, KRY olgunluk modellerinin uzmanlarca bilinirliğini ölçmüş ve KRY olgunluk düzeyini tanımlamada en çok öne çıkan dört unsur belirlenmiştir. Buna göre üst yönetim desteği, risk yönetimi bilgisi, acil eylem planı ve paydaşlarla iletişim üzerinden yapım firmalarında risk yönetim olgunluk düzeyi ölçme olanağı sağlayan yeni bir model geliştirmişlerdir[25].

Bir başka çalışma, kurumsal düzeyde olmasa da inşaat firmalarında var olan risk yönetiminin olgunluğunu ölçmeye yönelik Endonezya'da gerçekleştirilmiştir. Çalışmada öz değerlendirme modeli geliştirilip Caldeon ve Pero (2013), Cienfuegos (2013) ve Ciorciari ile Blattner'in (2015) kullandığı olgunluk seviyesi ölçütlerinden faydalanmıştır. Delphi ve AHP yöntemleriyle yürütülen çalışmada, kamu inşaat projelerinin müşteri kuruluşları için risk yönetim olgunluğunu, organizasyonel kültür, risk yönetimi süreçleri, kaynakları ve uygulamaları olmak üzere dört boyutta ele alınmıştır. Çalışmanın sonucunda insan faktörünün ve organizasyon kültürünün öne çıktığı görülmüştür [26].

Yapım firmalarının kurumsal risk yönetimi olgunluğu konusunda çalışmalarıyla öne çıkan Zhao, literatürden elde ettiği 16 temel kriterle yapım firmalarının olgunluk düzeylerini belirlemiştir. Zhao, KRY olgunluğunun firma büyüklüğüyle pozitif ilişkili olduğu ve de KRY olgunluk düzeylerini artırmaya yönelik hem teknolojik uygulamalara hem de yönetsel yapılanmalara önem verilmesinin gerekliliği vurgulanmıştır [24].

Zhao (2014) sonraki çalışmasında 16 KRY olgunluk faktörünü etki derecesine göre sıralamış ve etki derecesine göre en yüksek altı faktörü anahtar faktör olarak isimlendirmiştir[24]. Altı anahtar faktör şöyle sıralanabilir;

- F01: Yönetim Kurulu ve üst düzey yönetimin kararlılığı
 - KRY01 Üst düzey yönetimin KRY uygulamaları konusunda sürekli, kararlı ve teşvik edici olması,
 - KRY02 Üst düzey yönetimin KRY uygulamaları ve yenilikleri çalışanları sürekli olarak bildirmesi

- F02: Kurumsal risk yönetimine sahip olma
 - KRY03 Firmanın KRY uygulamalarını gerçekleştirme sorumluluğunu alarak, müşteri ve yatırımcılarına güven vermesi
 - KRY04 KRY uygulamalarının geliştirilmesi konusunda üst düzey yöneticilerle direkt ve sürekli olarak iletişim içinde bulunulması
- F05: Yeterli kaynaklar
 - KRY05 KRY programlarına yeterli bütçe ayrılması
 - KRY06 Uzmanlaşmış KRY grubuyla KRY uygulamalarının ileri seviyede gerçekleştirilmesi
 - KRY07 KRY süreçlerinin yeterli sayıda araç ve çalışan ile yürütülmesi
- F06: Risk tanımlama, analiz ve tepkisi
 - KRY08 Risk kaynakları, riskin sebepleri ve potansiyel etkilerinin kapsamlı olarak tanımlanması
 - KRY09 Nicel risk yönetim araçları ve tekniklerinin kullanılması
 - KRY10 Kurumsal strateji, riskin önemi, risk toleransı ve kaynak mevcudiyeti göz önüne alınarak uygun tepkilerin verilmesi
 - KRY11 Tanımlanan riskler arasında anahtar risklerin seçilerek gelecek hedeflerde yol göstermesi açısından KRY uygulamaları tarafından sıklıkla belgelenmesi.
- F14: İş süreçlerine kurumsal risk yönetiminin entegre edilmesi
 - KRY12 Günlük yönetim ve iş süreçlerinin her aşamasına KRY'nin entegre edilmesi
 - KRY13 İş süreçlerinde KRY'nin uygulanma düzeylerinin sürekli olarak kontrol edilip, değerlendirilip, eksik noktaların geliştirilmesi
- F15: Hedeflerin belirlenmesi
 - KRY14 KRY programlarının gidişatına yön veren hedeflerin önceden belirlenmesi
 - KRY15 Olası bir hedef değişikliğinin KRY programına yansıtılması
 - KRY16 Formüle edilmiş ve yazıya dökülmüş bir dемеçle hedeflerin net şekilde anlaşılmasının sağlanması [24].

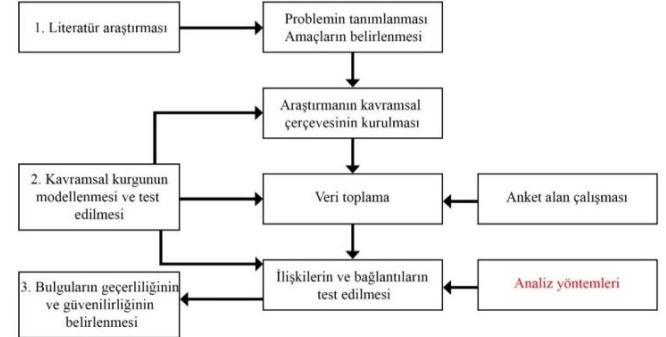
KRY olgunluğunu etkileyen 6 anahtar faktör, yapım firmalarında KRY olgunluk düzeyini ölçen ve KRY olgunluğunda risk yöneticisinin rolü ile KRY yapılaşması arasındaki ilişkileri inceleyen bu araştırmanın temelini oluşturmuştur.

5. METODOLOJİ

5.1. Araştırmanın Tasarımı ve Kavramsal Altyapısı

Bu çalışma, ilişkileri keşfetmeye yönelik nicel bir araştırmayı kapsamaktadır. Temel araştırma hipotezlerinin test edilmesi için gerekli veriler anket alan çalışmasıyla elde

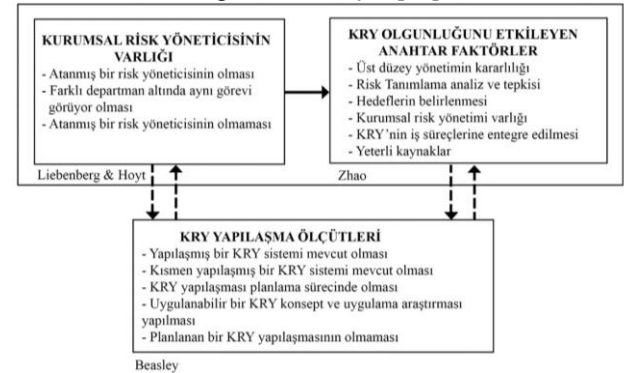
edilmiştir. Verilerin analizinde PASW-Statistics programı kullanılmıştır. Veriler, betimsel istatistikler ve ANOVA analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgularla bağlantılar ve ilişkiler test edilerek bulguların güvenilirliği ve geçerliliği belirlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2 Araştırmanın Tasarımı ve Uygulaması

5.2. Araştırmanın Kavramsal Altyapısı

Kurumsal risk yöneticisi varlığının KRY olgunluğuna etkisini ve bu iki etmenin KRY yapılaşma düzeyiyle ilişkisini incelemek araştırmanın kavramsal altyapısını oluşturmaktadır (Şekil 3). Risk yöneticisinin varlığı, atanmış bir risk yöneticisinin oluşu, olmayışı ve farklı departman altında aynı görevi görüyor oluşu olmak üzere üç temel durum üzerinden değerlendirilmiştir [16]



Şekil 3 Araştırmanın Kavramsal Altyapısı

Yapılaşmış bir KRY sisteminin olması, kısmen yapılaşmış bir KRY sisteminin oluşu, KRY'nin planlanma sürecinde oluşu, uygulanabilir bir KRY konseptinin araştırılıyor oluşu ve planlanan bir KRY yapılaşmasının olmayışı KRY yapılaşma ölçütlerini oluşturmaktadır [27]. KRY olgunluğunu ölçümü ise Zhao (2013)'nun 6 anahtar faktörü üzerinden gerçekleştirilmiştir [28].

5.3. Anket Alan Çalışması

Risk yöneticisinin varlığının kurumsal risk yönetimine etkisini ve KRY yapılaşmasıyla ilişkisini inceleyen araştırma için anket alan çalışması gerçekleştirilmiştir. Anket, dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, katılımcıyla ilgili bilgi edinme amaçlı soruları içermektedir. İkinci bölüm, firmayla ilgili bilgilerin edinildiği bölümdür. Üçüncü bölüm, firmanın KRY varlığı, risk yönetim süreci, risk yöneticisinin varlığı ve KRY yapılaşma düzeyi ile ilgili soruları içeren

bölümdür. Dördüncü bölüm KRY olgunluk düzeyini etkileyen 6 anahtar faktörün 16 parametresinin KRY olgunluğuna olan etkisi inceleyen bölümdür.

5.4. Örneklem

Türk Müteahhitler Birliği'ne üye olan yapım firmalarının çalışanlarına LinkedIn üzerinden ulaştırılan anket aracılığıyla yapılan çalışma, 24.12.2018 – 06.02.2019 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. 670 kişiye ulaştırılan anket alan çalışması, 95 kişinin yanıtıyla sonuçlanmış, geri dönüş oranı %14 olarak belirlenmiştir.

5.5 Araştırma Verilerinin Analizi ve Yorumu

5.5.1 Betimsel İstatistikler

Anket Katılımcılarının Demografik Özellikleri

Yapım firmalarında görev alan 95 kişinin katılımıyla gerçekleştirilen anket sonuçlarına göre, katılımcıların %4,2'sinin yaşı 25'ten küçük, %58,9'u'sunun yaşı 26-39 yaş aralığında, %35,8'inin yaşı 40-59 yaş aralığında iken, %1,1'i 60 yaş ve üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Katılımcı grubun genç ve orta yaş grubunda olduğu görülmüştür (Tablo 3).

Tablo 3 Anket Katılımcılarının Demografik Özellikleri

	SIKLIK	%
Yaş		
25'ten küçük	4	4,2
26-39	56	58,9
40-59	34	35,8
60 ve üstü	1	1,1
Eğitim durumu		
Lise	1	1,1
Üniversite	58	61,1
Yüksek lisans ve üstü	36	37,9

Katılımcıların firmalardaki pozisyonları inşaat mühendisi, proje müdürü, kurumsal risk koordinatörü, planlama mühendisi, risk yönetimi mühendisi, proje kontrol mühendisi, teknik ofis yöneticisi, yapım yöneticisi, genel müdür, üst düzey yönetici finansal kontrol ve raporlama mühendisi, proje koordinatörü, sözleşme yöneticisi ve yönetim kurulu üyesidir.

Firmalardaki kurumsal risk yönetimi (KRY) varlığı

Firmaların KRY varlığını öğrenmek üzere yöneltilen soruya katılımcıların %57,9'u evet olarak, %42,1 i hayır olarak yanıtlamıştır (Tablo 4).

Tablo 4 Firmalardaki KRY Varlığı

	SIKLIK	YÜZDE	GEÇERLİ YÜZDE	KÜMÜLATİF YÜZDE
Hayır	40	42,1	42,1	42,1
Evet	55	57,9	57,9	100,0

Firmaların KRY yapılaşma düzeyleri

Anket verilerine göre firmaların %24,2'si yapılaşmış bir KRY sistemine sahiptir. Kısmen yapılaşmış KRY sistemine sahip firmaların oranı ise %8,4 olarak ölçülmüştür. KRY yapılaşması planlama sürecinde olan firmaların oranı %14,7 iken uygulanabilir bir KRY konsept ve uygulama araştırması yapan firmaların oranı %29,5'tir. Katılım gösteren firmaların %23,2'sinde ise planlanan bir KRY yapılaşması yoktur (Tablo 5).

Tablo 5 Firmaların KRY Yapılaşma Düzeyleri

	SIKLIK	YÜZDE	GEÇERLİ YÜZDE	KÜMÜLATİF YÜZDE
Yapılaşmış bir KRY sistemi mevcut.	23	24,2	24,2	24,2
Kısmen yapılaşmış bir KRY sistemi mevcut.	8	8,4	8,4	32,6
KRY yapılaşması planlama sürecinde.	14	14,7	14,7	47,4
Uygulanabilir bir KRY konsept ve uygulama araştırması yapılıyor	28	29,5	29,5	76,8
Planlanan bir KRY yapılaşması yok.	22	23,2	23,2	100,0

Firmalardaki risk yöneticisi varlığı

Firmaların %38,9'unda atanmış bir risk yöneticisi mevcutken, %24,2'sinde aynı görevi yapan farklı bir departman bulunmaktadır. %36,8'inde ise atanmış bir risk yöneticisi bulunmamaktadır (Tablo 6).

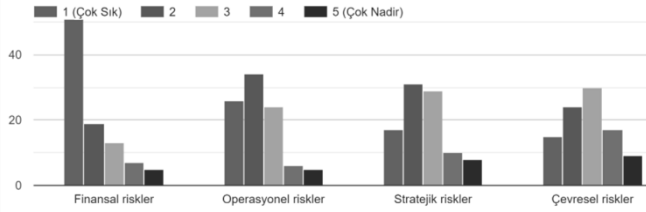
Tablo 6 Risk Yöneticisi Varlığı

	SIKLIK	YÜZDE	GEÇERLİ YÜZDE	KÜMÜLATİF YÜZDE
Atanmış bir risk yöneticisi mevcut.	37	38,9	38,9	38,9
Farklı bir departman altında ancak aynı görevi yapıyor.	23	24,2	24,2	63,2
Atanmış bir risk yöneticisi yok.	35	36,8	36,8	100,0

Firmalarca göz önünde bulundurulmuş risk grupları

Farklı risk gruplarına maruz kalındığı bir sektör olan yapım sektöründe finansal, operasyonel, stratejik ve çevresel risklerden en çok göz önünde bulundurulmuş risk grubu finansal risk grubu olmuştur. Belirli bir maliyet planlaması kapsamında yürütülen ve piyasa koşullarından etkilenen iş ağına sahip olan yapım sektöründe faaliyet gösteren firmaların en çok finansal riskleri göz önünde bulundurması kaçınılmazdır. Finansal risklerden sonra daha fazla göz önünde bulundurulmuş risk grupları operasyonel ve stratejik riskler olmuştur (Şekil 4). Disiplinler arası çalışmaların sergilendiği bir sektör olan yapım sektöründe operasyonel risklerin önemi büyüktür. Kurumsal risk yönetimin temel unsurlarından biri olan hedeflerin belirlenmesi, firma stratejisine yön vererek bu alandaki risklerin tanımlanması, analizi ve tepkisinin önemini ortaya koyar. Bu sebeple

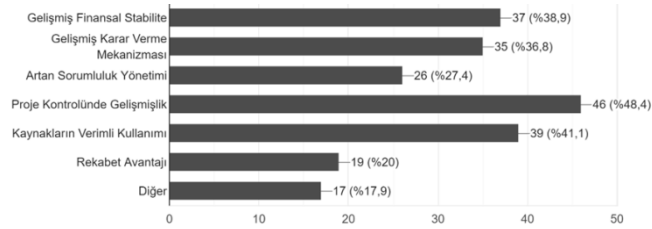
stratejik risklerin göz önünde bulundurulma firma amaç ve hedefleri açısından anlamlıdır.



Şekil 4 Firmalarca Göz Önünde Bulundurulmuş Risk Grupları

KRY uygulamalarının firmalara sağladığı getiriler

Anket katılımcılarının cevaplarına göre KRY uygulamalarının firmalara sağladığı getirilere ilişkin öne çıkan üç temel getiri; proje kontrolünde gelişmişlik, kaynakların verimli kullanımı ve gelişmiş finansal stabilite olmuştur (Şekil 5).



Şekil 5 KRY uygulamalarının firmalara sağladığı getiriler

5.5.2 ANOVA Analizi

Faktör veya faktörlerin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için deney birimlerinden elde edilen gözlem değerlerine uygulanan tekniğe Varyans Analizi (*ANalysis Of VAriance – ANOVA*) denir. İki'den fazla grup durumunda parametrelerin gruplar arası karşılaştırmalarında Tek yönlü (*One way*) Anova testi kullanılır.

KRY olgunluk düzeyine etki eden parametrelerin KRY yapılaşması varlığı ile ilişkisinin ANOVA analiz sonuçları Tablo 7 'de verilmiştir, gruplar arasındaki farkı belirleyebilmek için Tukey testi kullanılarak anlamlılık

düzeyi $p < 0,01$ alınmıştır.

Tablo 7 KRY olgunluk düzeyine etki eden parametreler ve KRY yapılaşması varlığı: ANOVA Analizi

KRY YAPILAŞMASI VARLIĞI	N	ORTL.	STD. SAPMA	F	SİG.	
KRY-01	HAYIR	40	2,32	1,24	29,5	,00*
	EVET	55	3,63	1,09		
KRY-02	HAYIR	40	2,25	1,40	16,6	,00*
	EVET	55	3,36	1,23		
KRY-03	HAYIR	40	2,32	1,24	22,4	,00*
	EVET	55	3,50	1,16		
KRY-04	HAYIR	40	2,52	1,32	17,9	,00*
	EVET	55	3,56	1,06		
KRY-05	HAYIR	40	2,02	1,22	19,9	,00*
	EVET	55	3,14	1,19		
KRY-06	HAYIR	40	2,05	1,17	22,2	,00*
	EVET	55	3,27	1,29		
KRY-07	HAYIR	40	2,02	1,16	23,7	,00*
	EVET	55	3,23	1,21		
KRY-08	HAYIR	40	2,42	1,12	27,2	,00*
	EVET	55	3,60	1,04		
KRY-09	HAYIR	40	2,27	1,15	34,8	,00*
	EVET	55	3,54	,93		
KRY-10	HAYIR	40	2,27	1,08	34,2	,00*
	EVET	55	3,58	1,06		
KRY-	HAYIR	40	2,22	1,12	34,9	,00*
	EVET	55	3,56	1,06		
KRY-12	HAYIR	40	2,15	1,14	21,2	,00*
	EVET	55	3,20	1,06		
KRY-13	HAYIR	40	2,22	1,16	24,3	,00*
	EVET	55	3,40	1,13		
KRY-14	HAYIR	40	2,35	1,12	22,5	,00*
	EVET	55	3,45	1,11		
KRY-15	HAYIR	40	2,27	1,21	25,2	,00*
	EVET	55	3,50	1,15		
KRY-16	HAYIR	40	2,30	1,20	22,7	,00*
	EVET	55	3,50	1,23		
*(p < 0,05)						

Yapılan ANOVA analizi sonuçları tüm parametreler için KRY yapılaşması varlığı durumları arasında anlamlı bir farklılık bulunduğunu göstermektedir ($p < 0,01$).

Tablo 8 KRY olgunluk parametreleri ve risk yöneticisinin varlığı: ANOVA Analizi

RİSK YÖNETİCİSİNİN VARLIĞI		N	ORTL.	STD. SAPMA	F	SIG.
KRY-01	VAR.	37	2,37	1,27	12,9	,00*
	KİSMİ	23	3,13	1,09		
	YOK	35	3,80	1,13		
KRY-02	VAR	37	2,13	1,29	13,0	,00*
	KİSMİ	23	2,95	1,22		
	YOK	35	3,65	1,25		
KRY-03	VAR	37	2,37	1,34	9,8	,00*
	KİSMİ	23	3,04	1,14		
	YOK	35	3,65	1,13		
KRY-04	VAR.	37	2,35	1,27	17,5	,00*
	KİSMİ	23	3,21	,90		
	YOK	35	3,88	1,02		
KRY-05	VAR	37	1,97	1,30	11,5	,00*
	KİSMİ	23	2,82	1,02		
	YOK	35	3,31	1,18		
KRY-06	VAR	37	1,97	1,23	19,5	,00*
	KİSMİ	23	2,60	,98		
	YOK	35	3,68	1,20		
KRY-07	VAR.				14,3	,00*
	KİSMİ	23	2,73	1,13		
	YOK	35	3,48	1,19		
KRY-08	VAR	37	2,40	1,16	19,0	,00*
	KİSMİ	23	3,00	,85		
	YOK	35	3,91	1,01		
KRY-09	VAR	37	2,29	1,19	15,8	,00*
	KİSMİ	23	3,13	,96		
	YOK	35	3,68	,93		
KRY-10	VAR.	37	2,37	1,18	13,5	,00*
	KİSMİ	23	3,00	1,12		
	YOK	35	3,74	1,01		
KRY-11	VAR	37	2,27	1,17	15,1	,00*
	KİSMİ	23	3,08	1,12		
	YOK	35	3,71	1,04		
KRY-12	VAR	37	2,13	1,13	13,7	,00*
	KİSMİ	23	2,69	1,06		
	YOK	35	3,45	1,01		
KRY-13	VAR.	37	2,18	1,12	17,2	,00*
	KİSMİ	23	2,82	1,26		
	YOK	35	3,71	,95		
KRY-14	VAR	37	2,24	1,16	17,8	,00*
	KİSMİ	23	3,04	,92		
	YOK	35	3,74	1,03		
KRY-15	VAR	37	2,18	1,19	16,7	,00*
	KİSMİ	23	3,13	1,05		
	YOK	35	3,74	1,14		
KRY-16	VAR	37	2,21	1,20	18,0	,00*
	KİSMİ	23	2,95	1,18		
	YOK	35	3,85	1,08		
*(p < 0,05)						

Tablo 7’de KRY yapılaşmasının olmadığı durumlarda KRY olgunluğuna etki eden parametrelerin değerleri ortalamanın altında ölçülmüşken; KRY yapılaşmasının varlığı durumunda KRY olgunluğuna etki eden parametrelerin ortalama değerlerinin ortalamanın üzerinde ve daha yüksek olduğu görülmüştür. KRY yapılaşmasına sahip firmalar için 16 parametre arasından etki düzeyi en yüksek olan üç parametre ise şu şekilde sıralanabilir:

- Üst düzey yönetimin KRY uygulamaları konusunda sürekli, kararlı ve teşvik edici olması
- Risk kaynakları, riskin sebepleri ve potansiyel etkilerinin kapsamlı olarak tanımlanması
- Kurumsal strateji, riskin önemi, risk toleransı ve kaynak mevcudiyeti göz önüne alınarak uygun tepkilerin verilmesi.

KRY olgunluk parametrelerinin farklılaşmasını, risk yöneticisinin varlığına göre karşılaştıran ANOVA analizine göre ise risk yöneticisinin varlığı ve KRY olgunluğunu etkileyen parametreler arasında anlamlı bir farklılık vardır ($p < 0,05$). Tablo 8’ya göre, atanmış bir risk yöneticisi varlığında KRY olgunluk parametreleri ortalamasının altında değerlere sahipken, atanmış bir risk yöneticisi olmaması durumunda KRY olgunluğuna etki eden parametrelerin ortalama değerleri daha yüksek ve ortalama değer üzerinde ölçülmüştür.

Bu ilişkiler arasında etki değeri en yüksek olarak ölçülen parametreler;

- Üst düzey yönetimin KRY uygulamaları konusunda sürekli, kararlı ve teşvik edici olması
- KRY uygulamalarının geliştirilmesi konusunda üst düzey yöneticilerle direkt ve sürekli olarak iletişim içinde bulunulması
- Formüle edilmiş ve yazıya dökülmüş bir dемеçle hedeflerin net şekilde anlaşılmasının sağlanması olmuştur.

6. SONUÇ

Risklerle karşılaşmanın kaçınılmaz olduğu yapım sektöründe faaliyet gösteren firmalar için KRY uygulamalarını geliştirmek firmaların sürdürülebilir başarısı için önem kazanmaktadır. KRY olgunluk düzeylerini yükseltici ve KRY ile ilgili eksik bilgilerin giderilebileceği çalışmalar yapılarak farkındalık sağlanmalıdır. Bu çalışmalardan elde edilecek bilgiler teknolojik kaynaklarla da desteklenerek iş süreçlerinde en yüksek seviyede fayda sağlanmalıdır.

Literatürde, iş süreçlerinin çok paydaşlı yapısına ve kapsamı ve niteliği sebebiyle risklere maruz kalma olasılığının bir hayli fazla olduğu yapım sektörünün KRY’yi benimsemeye öncül bir sektör olması gerekliliğine vurgu yapılmıştır. KRY, firma ve paydaş değerlerine katkıda bulunan, firma strateji ve hedeflerine bütüncül bir yaklaşımla yön vererek etkili risk analiz ve yönetim süreçlerine olanak sağlayan yeni bir yaklaşımdır.

Bu çalışma kapsamında, yapım firmalarında KRY olgunluk düzeyi değerlendirilmiş, risk yöneticisinin ve KRY yapılaşması varlığının KRY olgunluk düzeylerine etkileri araştırılmıştır. Çalışmanın temel sonuçları şu şekilde özetlenebilir:

• KRY olgunluğuna etkisinde ortalamanın üzerinde değerler olarak en çok öne çıkan iki faktör “KRY’ye sahip olma (F-02)” ile “Risk tanımı, analiz ve tepkisi (F-06)” olmuştur. “KRY’ye sahip olma (F-02)” faktörü, KRY uygulamalarının üst düzey yönetim ile sürekli iletişim halinde olarak geliştirilmesini beraberinde getirmektedir. Ayrıca, üst düzey yönetimin KRY uygulamaları konusunda aktif ve istekli olması organizasyon içerisinde sürekli iletişimle KRY uygulamalarının geliştirilerek devam etmesi KRY olgunluğu için kritik önem taşımaktadır. Kurumsal risk yönetiminin temel unsurlarından biri olarak nitelendirilen “risk tanımı, analizi ve tepkisi”, firmanın hedeflerine göre şekil alan bir süreçtir. Elde edilen sonuçlara göre, yapım firmalarında hedefler doğrultusunda ve stratejilere uygun olarak gerçekleştirilen risk tanımı, analiz ve tepkisi süreci firmaların KRY işlevinin en önemli bileşenidir. Araştırmada temel alınan anahtar faktörlerin altyapısını oluşturan Zhao’nun (2013) çalışmasında da risk tanımı, analiz ve tepkisi en yüksek etki seviyesine sahip ikinci faktör olarak belirlenmiştir [28]. Kuruluşların, kurumsal risk yönetimini hedef ve amaçlarına uyarlayarak riskleri tanımlaması, değerlendirmesi, tepki vermesi ve gözlemleyerek ilgili bölümlere rapor etmesi KRY’nin temel unsurlarını oluşturmaktadır (GAO) ve kurumsal firmalarda başarıyı yakalamada kritik bir faktördür [29]. Arena vd. [29] ile GAO tarafından da önemi vurgulanan “risk analiz, tanımı ve tepkisi faktörü” bu çalışma sonuçlarına göre de KRY olgunluğunda anlamlı bir etkiye sahiptir.

• ANOVA analiziyle, hem risk yöneticisinin varlığının hem de KRY yapılaşmasının varlığının KRY olgunluğunda yarattığı fark ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, araştırmanın çıkış noktası olan risk yöneticisinin varlığının KRY olgunluğuna olumlu olarak etki edeceği hipotezi beklenen sonucu vermemiştir. Başka bir deyişle, tek başına risk yöneticisinin varlığı KRY olgunluğunda etkili değildir. Diğer yandan, ANOVA analiziyle KRY yapılaşmasının varlığının KRY olgunluğuna etkisi araştırılmıştır ve olumlu etkilediği görülmüştür. Bu sonuca göre risk yöneticisinin varlığından çok organizasyon içerisinde yerleşmiş bir KRY yapılaşmasının varlığının KRY olgunluğunda etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Beasley vd. çalışmalarının sonucunda atanmış bir risk yöneticisinin varlığının KRY adaptasyonunda ve benimsenmesinde önemli bir faktör olduğunu belirtmişlerdir. Tüm bu bilgiler ışığında risk yöneticisinin varlığının KRY olgunluğuna olumlu etki etmesi beklenirken, tek başına yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır [30]. Bir diğer yandan, risk yöneticisinin varlığı da KRY yapılaşmasını olumlu etkileyecek bir faktördür.

Çalışmanın sonucuna göre, KRY yapılaşmasının varlığının KRY olgunluğuna etkisi anlamlıdır, bu sonucu COSO’nun KRY tanımı da destekler niteliktedir. COSO’nun KRY tanımında, kurumsal risk yönetimi, organizasyon içerisinde çeşitli düzeydeki risk yöneticilerinin ve çalışanlarının dâhil olduğu, aktif bir süreç olarak değerlendirilmiştir. Özetle, risk yöneticisi düzeyinde kalan bir KRY süreci değil, organizasyon düzeyinde ve organizasyon genelinde

yürütülen KRY süreçlerinin KRY olgunluğuna olumlu etkisi bu çalışmanın en temel bulgusudur[1].

• KRY yapılaşması olan firmalarda yeterli kaynakların önemi ve verimli kullanımına ilişkin firma düzeyinde eğitimler ve uygulamalar yapılarak farkındalık pekiştirilmelidir. KRY’nin iş süreçlerine entegre edilme düzeyi KRY sisteminin yapılaşma düzeyiyle doğru orantılıdır. Yeterli kaynakların kullanılarak iş süreçlerine KRY’yi entegre etmek, yapım firmalarının KRY yapılaşma düzeyini geliştirerek etkili ve verimli KRY süreçlerine olanak sağlayacaktır. Ayrıca risk yöneticisinin verilen tepkileri gözlemlenmesi, KRY süreci içerisinde üst düzey yönetim ve çalışanlar arasında bilgi akışını sağlayan bağlayıcı aktör rolünü oynaması önemlidir.

Bu çalışma, yapım firmaları bağlamında KRY olgunluk düzeyini, risk yöneticisi varlığı ve KRY yapılaşması varlığı ile ilişkilendirerek araştırmıştır. Düşük olarak ölçülen KRY olgunluk ve yapılaşma düzeylerini iyileştirmeye, risk yöneticisinin varlığının önemine ilişkin farkındalığı sağlamaya yönelik yapılacak çalışmalar yapım sektöründeki KRY süreçlerinin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır.


KAYNAKÇA

- [1] COSO - Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission, “Enterprise risk management—integrated framework: executive summary,” Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission, New York, 2004.
- [2] S. Soltanzadeha, S. Z. A. Rasida, N. Golshanb, F. Quoquaba ve R. Basiruddina, “Enterprise risk management practices among Malaysian firms,” International Conference on Accounting Studies (ICAS), Kuala Lumpur, Malaysia, 2014.
- [3] X. Zhao, B. Hwang, ve S. Pheng Low, "Enterprise risk management implementation in construction firms: An organizational change perspective," Management Decision, vol. 52 no. 5, pp. 814-833, 2014.
- [4] J. Y. Liu, P.X.W. Zou ve W. Gong, “Managing project risk at enterprise level: exploratory case studies in China,” Journal of Construction Engineering and Management, vol. 139, no. 9, pp. 1268-1274, 2013.
- [5] S. Adibi, “Industry should embrace risk management tools,” New York Construction News, February, 2011.
- [6] G.A. Holton, “Closed Form Value at Risk,” Working Paper, Contingency Analysis, Boston, July 25, 2002.
- [7] J. Deragon, “Old knowledge with a new name. Online publishing,” Erisk.com, November, 2000. [Online]. Available: <http://www.Erisk.com>. [Access Sept. 27, 2015].
- [8] R. Banham, “Kit and Caboodle: Understanding the Skepticism about Enterprise Risk Management,” CFO Magazine, April, p. 63, 1999.
- [9] J. Miccolis, ve S. Shah, “Enterprise Risk Management: An Analytic Approach,” Tillinghast–Towers Perrin Monograph, New York, 2000.
- [10] Institute of Internal Auditors (IIA), “Risk or Opportunity - the Choice Is Yours,” Tone at the top, vol. 11, para. 20, September, 2001.

- [11] T. T. Perrin, "Creating Value through Enterprise Risk Management - a Practical Approach for the Insurance Industry," A Tillinghast-Towers Perrin Monograph Risk Value Insights, 2001. [Online]. Available: <http://ermworkingparty.pbworks.com/f/Value+through+ERM+TP+2002051306.pdf>. [Accessed Dec. 10, 2018].
- [12] S.P. D'Arcy ve J.C. Brogan, "Enterprise risk management," *Journal of Risk Management of Korea*, vol. 12, no. 1, pp. 207-228, 2001.
- [13] G. Dickinson, "Enterprise risk management: its origins and conceptual foundations," *The Geneva Papers on Risk and Insurance-Issues and Practice*, vol. 26, no. 3, pp. 360-366, 2001.
- [14] S.E. Harrington, G. Niehaus ve K.J. Risko, "Enterprise risk management: the case of united grain growers," *Journal of Applied Corporate Finance*, vol. 14, no. 4, pp. 71-81, 2002.
- [15] T. Barton, W. Shenkir ve P. Walker, *Making Enterprise Risk Management Pay off*. Upper Saddle River, NJ: Prentice PTR Hall, 2002.
- [16] A.P. Liebenberg ve R.E. Hoyt, "The determinants of enterprise risk management: evidence from the appointment of chief risk officers," *Risk Management and Insurance Review*, vol. 6, no. 1, pp. 37-52, 2003.
- [17] D. Sprčić, A. Kožul ve E. Pecina, "Managers' Support – A Key Driver behind Enterprise Risk Management Maturity," *Zagreb International Review of Economics and Business*, vol. 20, no. 1, pp. 25-39, 2017.
- [18] N.A. Manab, I. Kassim ve M.R. Hussin, "Enterprise-wide risk management (EWRM) practices: between corporate governance compliance and value creation," *International Review of Business Research Papers*, vol. 6 no. 2, pp. 239-252, 2010.
- [19] D. Wu ve D.L. Olson, "Enterprise risk management: small business scorecard analysis," *Journal of Production Planning & Control*, vol. 20, no. 4, pp. 362-369, 2009.
- [20] P. Bromiley, M.K. McShane, A. Nair ve E. Rustambekov, "Enterprise Risk Management: Review, Critique, and Research Directions," *Long Range Planning*, vol. 48, no. 4, pp. 265-276, 2015.
- [21] B. Weinstein, K. Blacker ve R. Mills, "Risk management for nonexecutive directors: creating a culture of cautious innovation," *Henley Discussion Paper no. 2*, Henley Management College, 2003.
- [22] X. Zhao, B. G. Hwang, B G ve S. P. Low, "Implementing enterprise risk management in a Chinese construction firm based in Singapore," *Proceedings of World Construction Conference 2012 (CIB W107)*, 28-30 June, 2012, pp. 434-444.
- [23] A. Serpell, X. Ferrada, L. Rubio ve S. Arauzo, "Evaluating Risk Management Practices in Construction Organizations," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, pp. 201-210, 2015.
- [24] X. Zhao, B. Hwang, M. ASCE ve S. P. Low, "Investigating Enterprise Risk Management Maturity in Construction Firms," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 140, no. 8, pp. 05014006/1-10, 2014.
- [25] R. Caiado, G. Lima, D. Nascimento, J. Vieira Neto ve R. de Oliveira, "Guidelines to Risk Management Maturity in Construction Projects," *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, vol. 13, no. 3, pp. 372-385, 2016.
- [26] A. Wibowo ve J. Taufik, "Developing a Self-assessment Model of Risk Management Maturity for Client Organizations of Public Construction Projects: Indonesian Context," *Procedia Engineering*, vol. 171, pp. 274-281, 2017.
- [27] M. Beasley, B. Branson ve B. Hancock, "The state of risk oversight - An overview of enterprise risk management practices," *AICPA Poole College of Management Enterprise Risk Management Initiative*, pp. 1-17, 2017.
- [28] X. Zhao, B. Hwang ve S. Low, "Critical success factors for enterprise risk management in Chinese construction companies," *Construction Management and Economics*, pp. 1199-1214, 2013.
- [29] M. Arena, M. Arnaboldi ve G. Azzone, (2011). 'Is enterprise risk management real,' *Journal of Risk Research*, vol. 14, no. 7, 2011.
- [30] M. S. Beasley, R. Clune ve D. R. Hermanson, "Enterprise Risk Management: An Empirical Analysis of Factors Associated with the Extent of Implementation," *The Journal of Accounting and Public Policy*, vol. 24, no. 1, pp. 521-531, 2005.
- [31] K. Arı, "Yapım Firmalarının Kurumsal Risk Yönetimi Olgunluğunda Risk Yöneticisinin Rolü," *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul*, 2019.

The Effect of the Length of the Customer Event History and the Staying Power of the Predictive Models in the Customer Churn Prediction: Case Study of Migros Sanal Market

*¹Birol Yüceoğlu,

¹Migros T.A.Ş., Turkey, byuceoglu@migros.com.tr, 

Research Paper

Arrival Date: 08.08.2019

Accepted Date: 10.03.2020

Abstract

The customer churn prediction problem is studied for various sectors under several aspects. In this study, we consider the effect of the length of the customer event history and the staying power of the predictive models for the churn prediction problem of a leading online fast-moving consumer goods retailer in Turkey. These are important aspects of the churn prediction models as they help decision makers to determine the optimal length of the past data for predicting the customer churn as well as lifespan of the predictive models. We find that the length of the customer event history logarithmically increases the predictive power of models, validating findings in the literature in the newspaper subscription sector. Regarding the staying power of the predictive models, we conclude that the models in online fast-moving consumer goods retailing has a slightly longer lifespan that the models discussed in the literature for an Internet service provider and an insurance company.

Keywords: The customer churn, Machine learning, Supervised learning, Length of customer event history, Staying power.

1. INTRODUCTION AND RELATED LITERATURE

The customer churn is an important topic in marketing and customer relationship management (CRM) in various sectors. The main reasons for the importance of the customer churn is increasingly strong competition and the monetary effects of losing customers. In addition to lost sales, churning customers provide bad word-of-mouth for the company. They can create negative experiences and have the potential to convince other loyal customers to churn. Furthermore, finding new customers is five times costlier than keeping the existing customers, Rust and Zahorik [15]. It is therefore, essential to predict the customer churn for preventing losing customers that are predicted to churn in the future.

The customer churn prediction problem has been studied for various sectors, including financial services, insurance, telecommunications and retailing. Glady et al. [7] predict the customer churn for a Belgian financial services company using customer lifetime value analysis. Advances in the data analytics allows various approaches to be used in the customer churn prediction problem. Lee et al. [10] use time-series classification to predict the customer churn for a telecommunications company. Kim et al. [9] use social networks to observe propagation patterns of the customer churn in customers' networks. In terms of conventional data analytics approaches, Lemmens and Croux [11] use bagging and boosting to predict the customer churn for a telecommunications company. Note that these examples are

from contractual sectors, where switching to a competitor is more difficult or in some cases costlier, either due to the cost of breaking a contract or the cost of the effort of breaking a contract. Predicting the customer churn in retailing provides an additional challenge as it is required to define customers and churning customers in this non-contractual setting. In a non-contractual setting, such as retailing, customers have lower switching costs. Therefore, it is easier for the customer to switch part of their purchases to a competitor. This event is called partial defection. Usually, partial defection leads to total defection as the customers switch more and more of their purchases to the competitors. Buckinx and Van den Poel [3] study customer attrition in FMCG retail, which requires defining customers and churning customers. They use RFM (recency, frequency, monetary) variables to predict the customer churn. The predictors that they use are also employed in this analysis. To decide on their customer base, they use a five months period of observation. The customers are included in the model if they are more frequent, i.e. their mean frequency is above average, and regular, i.e. the coefficient of variation for their interpurchase time is below average. They are labeled as churners if they do not satisfy this criterion in the next five months. In a recent paper, Martinez et al. [12] predict customers' future repurchase behavior in a non-contractual B2B setting. They use approaches like Lasso logistic regression, extreme learning machine and gradient boosting to predict customers' future repurchase behavior. In this B2B setting, predicting the

* Corresponding author: Birol Yüceoğlu: Migros T.A.Ş. Atatürk Mahallesi Turgut Özal Bulvarı No 7 34758 Ataşehir, İstanbul, Türkiye, byuceoglu@migros.com.tr, +90 216 579 3278

customer churn becomes especially important for planning purposes.

The customer churn in a multi-channel setting is important for different purposes as well. Hernant and Rosengren [8] study a Swedish grocery retailer that starts to operate an online store in addition to the physical stores. They find that the customers who use the physical store and start to also buy online are more profitable than the single channel customers or the online customers who start to buy from physical stores. Thus, predicting and preventing the customer churn is important for not losing the most profitable customers in a multi-channel setting.

In addition to predicting the customer churn, other aspects of the churn prediction problem have also been studied. Ballings and Van den Poel [1] study the effect of the length of customer event history. The authors create predictive models using historical customer data from one to sixteen years for a newspaper company. They conclude that the predictive performance of models increases as the length of the event history increases. However, this increase is logarithmic and after five years, adding past data has only marginal effect on the performance of the predictive models. They leave further study of the topic for other sectors as an open question. We make a similar observation and assert that the observations of authors are valid also in online FMCG retailing and that six months is a good choice for the length of the event history of the customers to predict the customer churn. This finding has the potential to impact the customer churn prediction models in the retail industry in terms of determining the length of the period of observation.

Risselada et al. [14] study the staying power of various models for churn prediction. The authors study the staying power of various models for the churn prediction problem. After building a model, they use the same model for predicting upcoming periods and compare the results obtained in terms of top-decile lift and Gini coefficient. They use decision trees and logistic regression (with and without bagging) and report their results on two data sets from an Internet service provider and an insurance company. They conclude that the predictive power of the models for the Internet service provider decreases two periods after the period of the estimation. For the insurance case, the predictive quality decreases one period after the estimation period. They leave further study of the topic for other sectors as an open question. We observe that the staying power of our prediction model is slightly longer. We assert that our model can predict two periods after the period of estimation with a reasonable success. However, moving further to three periods marginally decreases the performances of the models. In other words, it is less crucial to retrain the existing models in the retail industry as the staying power of the predictive models is longer.

Studying these aspects of the customer churn prediction models is important for decision makers on finding the optimal length of the customer event history, balancing the

performance of the models and their data requirements, and on deciding the frequency for updating the predictive models. In this non-contractual setting, deciding on the length of the customer event history also allows us to define customers to be included in the analysis. This study focuses on these aspects of the customer churn prediction for the online store of Migros Turkey, one of the leading fast-moving consumer goods (FMCG) retailers in Turkey. The online store, Sanal Market, is founded at 1997 and is one of the pioneers of online FMCG retailing in Turkey. Currently, Sanal Market operates in more than 20 cities with more than 20.000 products. Even though Sanal Market can still be considered as an alternative sales channel for Migros Turkey, the sector is growing much more rapidly than conventional retailing and with stronger competition, customer retention measures are essential for Migros Turkey to protect and grow its online customer base.

The rest of this paper is organized as follows: In Section 2, we describe the methodology, the approaches, and the time frame for the study. In Section 3, we investigate the effect of the length of the customer event history and conclude that the length of the customer event history logarithmically increases the performance of the predictive models in online FMCG retailing as stated by Ballings and Van den Poel [1] in the newspaper subscription sector. In Section 4, we discuss the staying power of the predictive models. We find that the models in the online FMCG retailing have a slightly longer lifespan that the models for sectors discussed by Risselada et al. [14]. In Section 5, we present our concluding remarks.

2. METHODOLOGY

We use supervised learning to predict the customer churn and compare the results obtained by three approaches: logistic regression, random forests, gradient boosting. In the supervised learning, ensemble methods are frequently used in classification problems. Breiman [2] introduces the random forests, an ensemble technique based on growing many decision trees with bootstrapping and selecting feature subsets and combining their results. As a result, the final model has some randomness and the approach is known to be averse to over-fitting. For this reason, the approach is frequently used in classification problems. The gradient boosting, introduced by Friedman [5,6] is an iterative boosting algorithm, where weak learners are trained so that the errors from the previous iterations are corrected. The approach becomes more and more popular because of several open-source packages employing the algorithm, such as Scikit-Learn, LightGBM, and Xgboost. Logistic regression, Cox [4], is a statistical technique based on linear regression models that is developed for categorical dependent variables. The approach is frequently used as a baseline approach in the classification problems. This study uses Scikit-Learn machine learning library, implemented for Python, Pedregosa et al. [13], where all three approaches are present.

In this study, we decide to restrict the customer base to focus on loyal and regular customers. Upon discussions with the business units, we decided to focus on customers having transactions in two different months in the last six months. These customers are considered as more regular and loyal, so their churn is more important to the company. Note that this also prevents us from obtaining artificially good results. Without such a restriction, new customers or irregular customers can also be included in the analysis. However, they are more prone to churn, which can disrupt the patterns in the data set and inflate the number of churners. This also may have the effect of falsely improving the results by only predicting the churn of irregular or new customers correctly. For the customer churn, we use two definitions, again based on the discussions with the business units. In the short term total defection, we predict customers who are not going to use the online store in the next month. In the long term total defection, we predict customers who are not going to use the online store in the next three months. We only consider the total defection scenarios as they are more valuable for the business units. The results of this study are also valid for the partial churn scenario. We use the transaction data from different time periods in our experiments. Our empirical study consists of two parts:

- **Length of Customer Event History:** In this part, we study the effect of the length of customer event history using the transaction data from 1 September 2015 to 30 November 2016. We use the data from September, 2016 to label the customers in the short term total defection scenario and the last three months (September, 2016 - November, 2016) to label the customers in the long term total defection scenario. Then, we use the past customer transaction data from one month (August, 2016) to 12 months (September, 2015 - August, 2016) by increasing the time interval by one month for each experiment. In all these experiments, 70% training - 30% testing split is used for those customers with the corresponding time interval.
- **Staying Power:** In this part, we examine the staying power of our predictive models. We build our predictive models using the data from 1 June 2015 to 29 February 2016. Again, December, 2015 is used for labelling the customer for the short term total defection scenario and the last three months (December, 2015 - February, 2016) are used for labelling the customer for the long term total defection scenario, and the data is split into two as 70% training and 30% testing. Then, we use this model to predict the churn for seven periods. The first period, labelled t , covers between 1 September 2015 to 31 May 2016. We use the same model to predict the customer churn for the subsequent periods from 1 October 2015 to 30 June 2016 (for period $t+1$), until 1 March 2016 to 30 November 2016 (for period $t+6$).

3. THE EFFECT OF THE LENGTH OF THE CUSTOMER EVENT HISTORY

In this section, we answer a question from the literature about the effect of the length of the customer event history. The length of the customer event history is especially important in determining the data requirements of churn prediction models and can shed some light on how models evolve in the presence of the historic data. Furthermore, storing and processing data require resources and determining the optimal length of customer event history is also important in terms of efficiency. Determining the optimal length of the customer event history also gives insight into the behaviour of the customers and can be used to determine the customer base.

Ballings and Van den Poel [1] observe that the length of customer event history logarithmically increases the performance of the prediction in newspaper subscription. In their experiments, they use data belonging to 16 years to predict the customer churn or a newspaper subscription. They observe that the data belonging to the most recent five years performs almost as well as their best prediction. They state in Section 6:

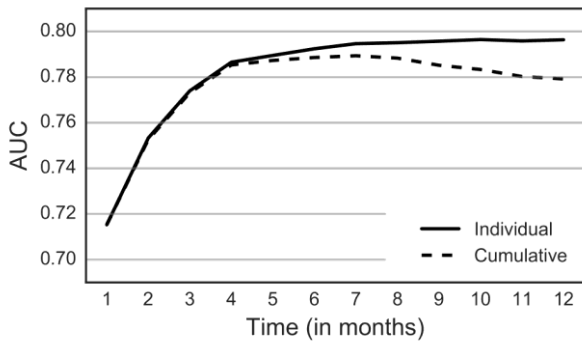
“Although we are confident about our results, it is unclear whether they can be generalized over a wider range of subscription services. Hence, it would be interesting to validate our findings on customer databases in other industries.”

We study the effect of the length of customer event history by predicting the customer churn using the data belonging to 12 months. The set of features we use include the transaction amounts (total, product categories), the number of transactions and transaction days, the discount percentages per product categories, the number of distinct categories purchased from, and the private label purchases. We create 25 features for each month and use two types of analysis in terms of how we include the features in our analysis.

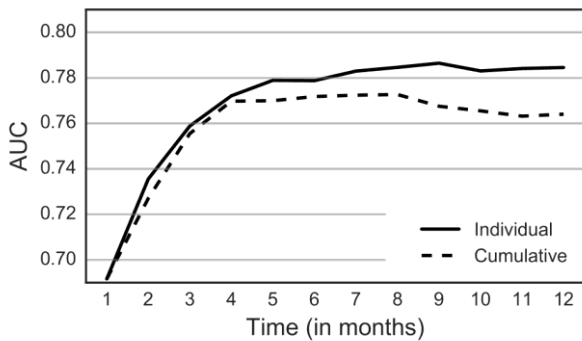
Our performance measure is area under curve. In cumulative analysis, we use 25 features and whenever we include the data from previous months we use aggregate values. In the individual analysis, we use 25 features for each month included in the analysis, up to 300 features for 12 months. We build 12 models to study the effect of the length of the customer event history.

We observe that the performance of our predictions increases logarithmically with respect to the length of the customer event history. In the cumulative analysis after six or seven months, the performance slightly decreases in some cases. In the individual analysis, the performance of the predictive model does not decrease with respect to the length of the customer event history. In most of the cases, the performance after six or seven months is quite close to the best model. The results for short term total defection are presented in Figure 1 and the results for long term total defection are presented in Figure 2. Our results are like Ballings and Van den Poel

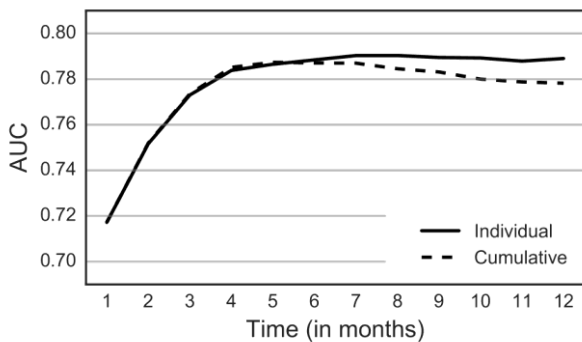
[1] and answer the generalization question from online FMCG retailing perspective. We find that the length of the customer event history logarithmically increases the performance of predictive models and data belonging to the most recent six or seven months is enough to predict the customer churn. The length of the customer event history can also be used to determine the customer base of the company for the churn prediction problem.



(a) Gradient boosting



(b) Random forest



(c) Logistic regression

Figure 1. The results for the effect of the length of the customer event history for short term total defection. The performance of the models increases only marginally after six or seven months.

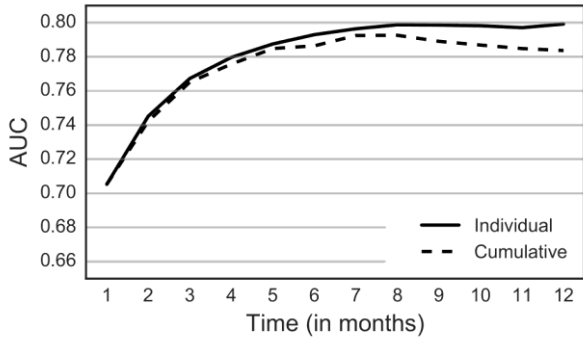
4. THE STAYING POWER OF THE PREDICTIVE MODELS

In this section, we answer another question from the literature about the staying power of the predictive models. Risselada et al. [14] study the predictive qualities of models in the periods after the estimation period for an Internet service provider and an insurance firm. They observe that the quality of a model decreases one or two periods after the period of the estimation. They state in page 207:

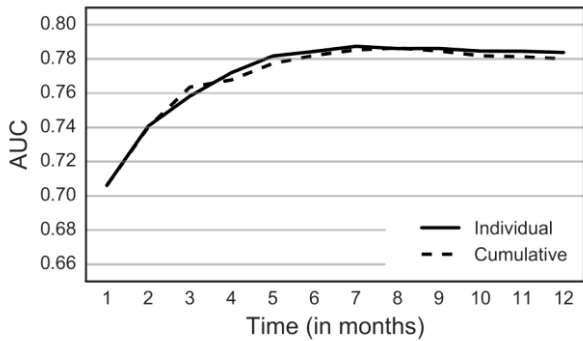
“Although we are confident with the results, it remains unclear whether they are generalizable over a broader range of services that the two we studied.”

To observe the staying power of the churn prediction models for the online FMCG retailer, we use the three models mentioned in Section 2, namely gradient boosting, random forests, and logistic regression, for the short term and the long term total defection. After creating a model to predict the customer churn in period t , we use the same model without retraining to predict the customer churn in the subsequent six periods, up to the period $t+6$. We use data belonging to 18 months (from June, 2015 to November, 2016) and features mostly related to RFM variables, proved to be effective predictors in the customer churn by Buckinx and Van den Poel [3]. We evaluate the performances of the models using two criteria: AUC and top-decile lift. The set of predictors that we use are presented in Table 1. We use similar variables to Buckinx and Van den Poel [3], but we also include the physical store purchases of the customers as Sanal Market operates in a multi-channel environment. The predictors that we use allows us to measure the effect of the recency, frequency, monetary values of the customers as well as their relationship with the product categories, their basket contents and their trust relationship with the company. We train our model using the transaction data from June, 2015 to February, 2016, with the last three months providing labels for our models. We train the models to predict the customer churn in time period t (between September, 2015 and May, 2016) and use the same model to predict the customer churn in six subsequent periods. The performances of the models increase in period $t+1$ for the short term total defection (between October, 2015 and June, 2016, see Figure 3(a)) and decrease only slightly in period $t+2$ (between November, 2015 and July, 2016). However, after the third period the predictive power of a model decreases significantly. The increase in the predictive performance at period $t+1$ is due to the increased churn probability at that period. Our observations hold for both AUC and top-decile lift in both scenarios. For the long term total defection, the models lose their predictive power after two periods, at $t+2$, see Figure 4(a). The results for the short term total defection scenario are presented in Figure 3 and the results for the long term total defection are presented in Figure 4. We assert that the staying power of the churn prediction models for online FMCG retailing is slightly longer than the sectors studied by Risselada et al. [14]. All three approaches used in the prediction behave similarly, showing the robustness of the results in terms of approaches selected.

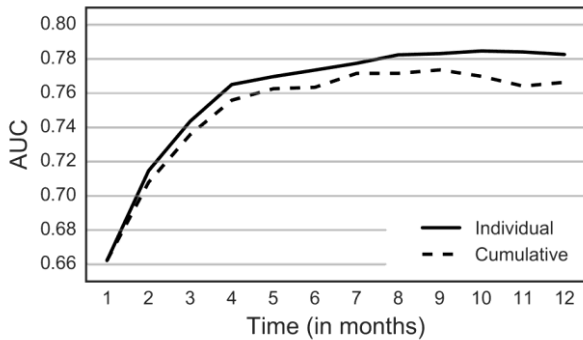
In cases where the customer base is large, and the data preparation and model training are cumbersome, these results suggest that using a trained model for two subsequent time periods does not cause a significant decrease in the predictive performance of the models.



(a) Gradient boosting



(b) Random forest



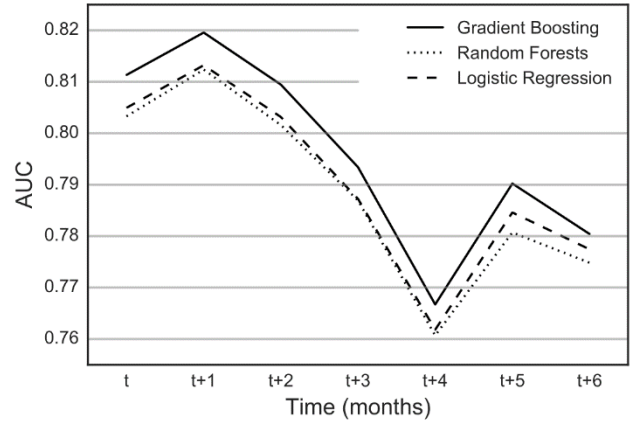
(c) Logistic regression

Figure 2. The results for the effect of the length of the customer event history for long term total defection. The performance of the models increases only marginally after six or seven months.

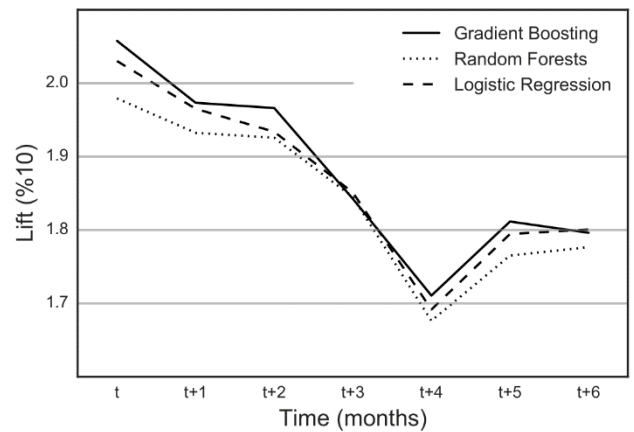
5. CONCLUSION

We have presented a computational study regarding two questions from the churn prediction literature, which are related to the effect of the length of the customer event

history and the staying power of the prediction models for FMCG online retailing, respectively. We observe that the length of the customer event history increases the performance of the prediction models logarithmically as observed by Ballings and Van den Poel [1]. Specifically, we see that the performance of the predictive models increases when the customer event history is lengthened to up to six



(a) AUC score of churn prediction model created for time period t .



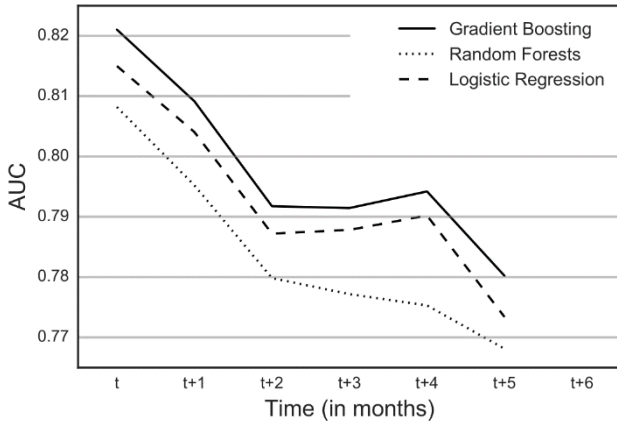
(b) Top-decile lift score of the churn prediction model created for the time period t .

Figure 3. The staying power of the predictive models for the short term total defection scenario.

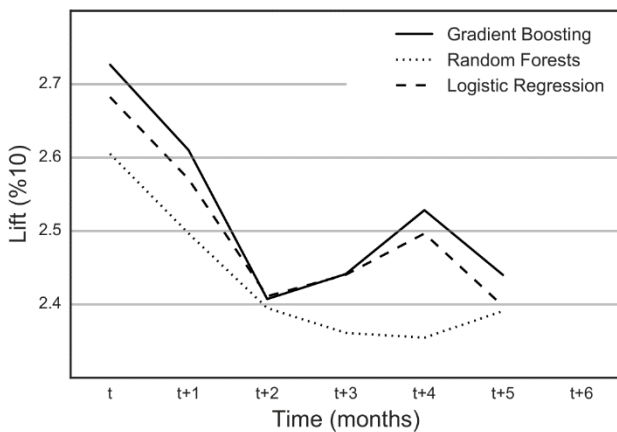
months. After that, the performance gains are only marginal. In addition to that, we assert that the staying power of a churn prediction model in online retailing is slightly longer than it is in Internet service providing and insurance sectors, Risselada et al. [14]. We observe that the customer churn prediction models can be used for two or three months (based on the definition of the customer churn), which is especially important when the customer base is large and training new models takes considerable time.

The findings have important implications in terms of CRM and data warehousing. Using customer data belonging to the most recent six or seven months can greatly reduce the data

storage and processing requirements. Similarly, being able to use the same predictive models for two or three months can provide advantages to various business units in terms of managing predictive models and manageability of CRM actions.



(a) AUC score of churn prediction model created for time period t .



(b) Top-decile lift score of the churn prediction model created for the time period t .

Figure 4. The staying power of the predictive models for the long term total defection scenario.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) under TEYDEB 1501 program, under grant numbered 3150376.

REFERENCES

[1] M. Ballings and D. Van den Poel, 2012. Customer event history for churn prediction: How long is long enough? *Expert Syst Appl*, 39(18), 13517-13522.

[2] L. Breiman, 2001. Random forests. *Mach Learn*, 45(1), 5-32.

[3] W. Buckinx and D. Van den Poel, 2005. Customer base analysis: partial defection of behaviourally loyal clients in a non-contractual FMCG retail setting. *Eur J Oper Res*, 164(1):252-268.

[4] D. R. Cox, 1958. The regression analysis of binary sequences (with discussion). *J R Stat Soc Series B Stat Methodol*, 20, 215-242.

[5] J. H. Friedman, 2001. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Ann Stat*, 29(5), 1189-1232.

[6] J. H. Friedman, 2002. Stochastic gradient boosting. *Comput Stat Data Anal*, 38(4), 367-378.

[7] N. Gladys, B. Baesens, and C. Croux, 2009. Modeling churn using customer lifetime value. *Eur J Oper Res*, 197(1), 402-411.

[8] M. Hernant and S. Rosengren, 2017. Now what? Evaluating the sales effects of introducing an online store, *J Retail Consum Serv*, Volume 39, 305-313.

[9] K. Kim, C.-H. Jun, and J. Lee, 2014. Improved churn prediction in telecommunication industry by analyzing a large network. *Expert Syst Appl*, 41(15), 6575-6584.

[10] Y.-H. Lee, C.-P. Wei, T.-H. Cheng, and C.-T. Yang, 2012. Nearest-neighbor-based approach to timeseries classification. *Decis Support Syst*, 53(1), 207-217.

[11] A. Lemmens and C. Croux, 2006. Bagging and boosting classification trees to predict churn. *J Mark Res*, 43(2), 276-286.

[12] A. Martínez, C. Schmuck, S. Pereverzyev, C. Pirker, and M. Haltmeier, 2018. A machine learning framework for customer purchase prediction in the non-contractual setting. *Euro J Oper Res*, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.04.034>.


[13] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, and E. Duchesnay, 2011. Scikit-learn: Machine learning in Python. *J Mach Learn Res*, 12, 2825-2830.


[14] H. Risselada, P. C. Verhoef, and T. H. Bijmolt, 2010. Staying power of churn prediction models. *J Interact Market*, 24(3), 198-208.

[15] R. T. Rust and A. J. Zahorik, 1993. Customer satisfaction, customer retention, and market share. *J Retailing*, 69(2), 193-215.

LTE Ağlarda Remote-Host ile PG-W Arasındaki Kuyruk Yönetim Algoritmalarının Performans Analizi

*¹Muhammet Çakmak, ²Zafer Albayrak

¹Karabük Üniversitesi, TOBB Mesleki ve Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü
muhammetcakmak@karabuk.edu.tr 

² Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, zalbayrak@karabuk.edu.tr, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 21.12.2019

Kabul Tarihi: 23.04.2020

Öz

Mobil iletişiminin hızlı gelişmesiyle internet içeriğinin çoğu günümüzde hücresel ağlar ile sağlanmaktadır. Hücresel ağlarda yaşanan tıkanıklık sırasında kullanılan algoritmalar paket gecikmesi, kuyruk taşması ve darboğaz problemlerini çözmeye çalışmaktadırlar. LTE ağlarında remote-host ile PG-W düğümü arasındaki veri transferi yüksek hız gerektirmekte bu da hücresel ağın çalışma hızını doğrudan etkilemektedir. Doğru bir kuyruk yönetim algoritmasının seçilmesi LTE hücresel ağı için kritik bir önem kazanmaktadır. Bu çalışmada LTE ağlarında remote-host ile PG-W arasında çalışan aktif kuyruk yönetim algoritmaları olan RED, CoDel, Pie ve pFIFO'nun performanslarının, uçtan uca ortalama verim, gecikme ve paket düşürme oranları üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir ve sonuçları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ns-3, Simülasyon yazılımı, RED, CoDel

Performance Analysis of Queue Management Algorithms Between Remote-Host and PG-W in LTE Networks

*¹Muhammet Çakmak, ²Zafer Albayrak

¹Karabuk University, TOBB Vocational and Technical Sciences Vocational High School, Computer Technologies,
muhammetcakmak@karabuk.edu.tr

²Karabuk University, Faculty of Engineering, Computer Engineering,
zalbayrak@karabuk.edu.tr

Abstract

With the rapid development of the mobile communication, most of the internet content is provided by cellular networks. The algorithms used during the congestion in cellular networks try to solve the problem of queue overflow and bottleneck. In the LTE network, the data transfer between the remote host and the PG-W directly affects the operating speed of the cellular network. Choosing an active queue management algorithm is critical to the LTE cellular network. In this study, the effect of the performance of RED, CoDel, Pie and PFIFO, which are active queue management algorithms operating between Remote Host and PG-W, on LTE network on end-to-end average throughput, latency and packet dropping rates were evaluated comparatively and the results were evaluated.

Keywords: Ns-3, Simulator Software, RED, CoDel

1. GİRİŞ

Hücresel ağlar mobil cihazların artışıyla son yıllarda çok hızlı bir değişim göstermiştir. Cisco raporuna göre 2022 yılında; mobil ağların kullanımı toplam IP trafiğinin %80'nin temsil edecektir ve akıllı telefonlar mobil internet trafiğinin %90'nını sağlayacaktır [1]. İnternetin hızla

yaygınlaşması, hücresel ağların kullanım oranları ve alanlarını genişletmekte ihtiyacını doğurmuştur. Bununla birlikte hücresel ağlarda daha az gecikme ve paket kaybı ihtiyaçlarının karşılanması daha fazla önem kazanmaktadır. Bu gereksinimler, LTE (Long Term Evolution) standardına dayalı 4G hücresel şebekelerinin tamamen paket anahtarlama yapısıyla sağlanmaktadır [2].

*Sorumlu Yazar: Karabük Üniversitesi, TOBB Mesleki ve Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü muhammetcakmak@karabuk.edu.tr

LTE, Genişband Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Wideband Code Division Multiple Access) (WCDMA) sistemlerine oranla daha yüksek bir verimlilik ve düşük gecikme süresi imkanı sağlamakta, büyük ölçüde geliştirilmiş sistem kapasitesi, kapsama alanı sağlayan yeni bir hava arayüzü ve radyo erişim ağı sunmaktadır [3]. Bu iyileştirmeler, geçmişten günümüze kadar kullanılan 1G/2G/3G sistemlere kıyasla, LTE üzerinde mobil hücresele ağlarda artan beklentilere yol açmaktadır. [4].

LTE'nin kaynakların kullanımında; yüksek kullanıcı veri hızı, sistem kapasitesinin iyileştirilmesi, gecikme süresinin azaltılması ve kapsama alanının verimli bir şekilde kullanılması sağlanmalıdır. LTE ağına veri trafiğinde, ağı yürütme kapasitesini aşan bir artış, Evolved Node B (eNodeB)'deki kullanıcı kuyruklarında paketlerin birikmesine sebep olmaktadır. Bu durum da eNodeB'deki kuyruk boyutunun küçüklüğü, fazla gelen paketlerin tamponda birikerek kuyruktan düşmesi ve kuyruk taşması sorunlarına neden olmaktadır [5].

LTE ağlarında Packet Gateway (P-GW) ile remote-host arasındaki trafik kontrolü sistem performansına doğrudan etki etmektedir. Remote-host'tan P-GW'ye gönderilen paketlerin eNodeB'deki tamponlarda birikmesi darboğaz ve kuyruk taşması (paket düşmesi) sorunlarına yol açmaktadır. eNodeB'lerde yaşanan dar boğaz, eNodeB'ye bağlanan, bağlanmak isteyen ve başka bir hücresele alana geçmek isteyen UE'ler için performans sorunları doğurmaktadır.

LTE'de sıkışıklık oluştuğunda yüksek verim ve düşük gecikmeyi sağlamak için önerilen çalışmalar, sunulan iyileştirmenin tek bir yönüne odaklanmakta, sisteme olan bütüncül etkisini ve katkısını değerlendirmemektedir. Bu çalışmada remote-host ile P-GW arasında çalıştırılan algoritmaların performansları uçtan uca verim, gecikme ve paket düşürme oranları gibi parametrelerle bütüncül olarak değerlendirilmiş ve her bir algoritmanın avantaj ve dezavantajları incelenmiş ve karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmanın devamında; ikinci bölümünde literatürdeki çalışmalar incelenmiş, üçüncü bölümde gerçek bir ağ yapısının simüle edilebilmesi için kullanılacak materyal ve yöntem ortamı gösterilmiştir. Dördüncü bölümde simülasyon sonuçları ve çıktıların değerlendirilmesi sağlanmıştır ve beşinci bölümde ise çalışmanın sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. İLGİLİ ÇALIŞMA

Kablolu ve kablosuz ağlarda, ağ tıkanıklığı ve bununla ilgili performans sorunlarını ele almak için araştırma toplulukları ve geliştiriciler ağ performansının artırılması için birçok kuyruk yönetim algoritması önermişlerdir. Bu algoritmalar ağ kullanımı, paket kaybı ve farklı trafik yükleri için uyarılabilirlik gibi özelliklerin bazılarını veya tamamını iyileştirmeyi amaçlamıştır. Bu yapılar, kayıp tabanlı tıkanıklık kontrolü [8], [9] gecikme tabanlı tıkanıklık

kontrolü [10], [11] ve hız tabanlı tıkanıklık kontrolü [12], [13] gibi sorunlara çözümler önermişlerdir. Önerilen bu Aktif Kuyruk Yönetim Algoritmaları (Active Queue Management) (AQM)'ler kapalı yöntem [14], [15], açık yöntem [16], [17] ve gecikme bazlı yöntemler [18], [19] ile sorunları çözmeye çalışmışlardır.

Lakshmi Kantha vd. kablolu bir ağda gerçek ve sanal temelli işaretleme şemalarını/algoritmalarını karşılaştırmıştır. Tasarladıkları Sanal Kuyruk (Virtual Queue) (VQ) tabanlı algoritmanın Gerçek Kuyruk (Real Queue) (RQ) tabanlı algoritma karşısında bozulmalara karşı dayanıklılık ve düşük kuyruk gecikmesine sahip olması açısından daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir [20].

Uydu ağları için önerilen AVQRED (Adaptive Virtual Queue RED) algoritması Sanal tabanlı Kuyruk (Adaptive Virtual Queue) (AVQ) ve RED'in karşılaştığı uyumsuz kuyruk salınımları ve global senkronizasyon problemlerine çözüm getirerek ağı kararlılığını artırmıştır. Bu kapsamda bağlantı ile ilgili bozulmaları azaltmaya çalışan PEP'ler, arabellekte biriken kuyruklarla karşılaştığında sorun yaşamaktadır. Bu sorunları adaptif bir kuyruk sistemi ile kaynakları paylaşarak çözüm sağlamıştır [21].

LTE'de eNodeB için RLC katmanında değişken trafik yüklerinde tampon sıkışıklığı ve paket düşmesinin önlenmesi için RED'deki varyans değerinin ayarlanmasıyla çalışan akıllı AQM olan smRED (smart-RED) ile paket programcılarının tek hücre ve çok hücrede devretme (handover) ve devretme olmadan iş hacmi/verim, gecikme ve sapma değerleri üzerine etkisi incelenmiştir. RED'in ayarlanan varyans değeri düşük ve yüksek yük durumlarında farklı değerler olarak RCL tamponlarında biriken paketlerin düşmesini etkilemiştir [23].

Paket Programlayıcı Sıkışıklık Geri Besleme Mekanizması (Packet Scheduling Congestion Identification and Feedback Mechanisms) ile kuyruk taşmasından kaçınmak ve kuyruktaki gecikmeleri azaltmak için kuyruk taşması ve paket gecikme tahmininin erken tanımlanması, eNodeB'deki ağ tıkanıklığının tahmini, sıkışıklık penceresi boyutunu ayarlamak için kaynak düğümüne bildirimde bulunulması iyileştirilmeleri bir düzen şeklinde yapılmıştır. Paketin QoS değeri ile paketin TCP yada UDP olarak tanımlanması sağlanmış ve dolu kuyrukların tahmini için ortalama bir değer hesaplanarak paket düşüşlerine dayanıksız olan TCP için düşük, UDP için ise yüksek düşük aralıkları belirlenmiş böylece paket düşüşünden kaçınılmıştır. Gönderici tıkanıklık penceresi ağı trafik durumuna göre yüksek, orta ve düşük olarak ayarlanarak eNodeB'deki kuyruk taşmasının önüne geçilmeye çalışılmıştır [24].

Bu çalışmada, NS-3 ağ simülatörünü kullanarak LTE ağlarında her bir algoritmanın performans analizine odaklandık. Ayrıca, her algoritmanın kendi parametrelerini koruyarak ve farklı Kullanıcı Ekipmanı (User Equipment) (UE) Numaralarına göre simülasyon çalışması yapılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

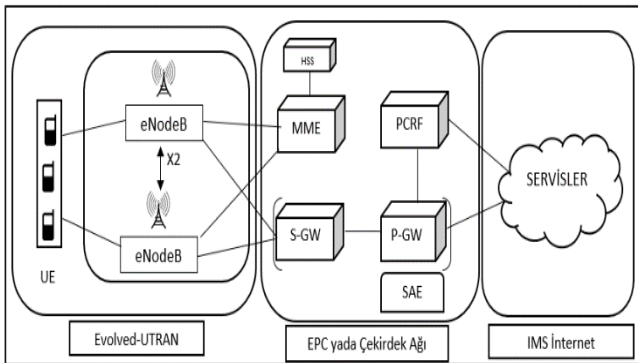
LTE ağlarında remote-host tarafından üretilen paketler P-GW düğümünden eNodeB aracılığı ile hedeflere ulaştırılır. Hücrel ağ içerisindeki mobil kullanıcılar eNodeB'ye hava arayüzü üzerinden bağlanmaktadır. LTE ağlarında yaşanan paket düşüşleri, düşürülen paketlerin yeniden iletilmesi ve ağ kaynaklarının gereksiz kullanımına sebep olur. eNodeB'deki kullanıcı kuyruklarındaki yaşanan kuyruk taşması problemini azaltmak ve uygun bir şekilde çözmek için aktif kuyruk yönetimi algoritmalarından yararlanılmaktadır. Bu çalışmada sırasıyla LTE mimarisinin genel yapısını, P-GW düğümünün işlevini ve aktif kuyruk yönetim algoritmaları incelenmektedir.

3.1. LTE Mimarisi

LTE'nin temel amacı, esnek bant genişliği, yüksek veri hızı, düşük gecikme süresi ve optimize edilmiş paket tabanlı radyo erişim teknolojisi sağlamaktır. Aynı zamanda, ağ mimarisi, kesintisiz hareketlilik ve yüksek hizmet kalitesi ile paket anahtarlamalı trafiği desteklemek için tasarlanmıştır.

LTE sistemi, Sistem Mimarisi Evrimi (System Architecture Evolution) (SAE) olarak bilinen bir mimariye dayanmaktadır. LTE, yüksek hızda veri ve sinyal iletimi ve sorunsuz bir hareket desteği sağlamaktadır. Şekil 1'de gösterildiği gibi, esas olarak çekirdek ağ yani Evrimleşmiş Paket Çekirdeği (Evolved Packet Core) (EPC) ve Evolved-Universal Karasal Radyo Erişim Ağı (Evolved Universal Terrestrial Access Network) (E-UTRAN) olarak adlandırılan iki bölümden oluşmaktadır [25].

Gelişmiş paket çekirdeği IP multimedia alt sistemine (IP Multimedia Subsystem) (IMS) bağlanır. Ev Abone Sunucusu (Home Subscriber Server) (HSS), EPC' de veri tabanı görevi gören ana IMS veri tabanıdır. EPC'nin üç ana fonksiyonel birimi vardır: Mobilite Yönetimi Varlığı (Mobility Management Entity) (MME), Servis Ağ Geçidi (Serving Gateway) (S-GW) ve Paket Veri Ağ Geçidi (Packet Data Network Gateway) (P-GW). MME, ağa bağlantı kurulduktan sonra kullanıcı mobilitesinden, kullanıcı ekipmanının LTE'deki geçiş, takip ve çağrı işlemlerinin ele alınmasından sorumludur [26].

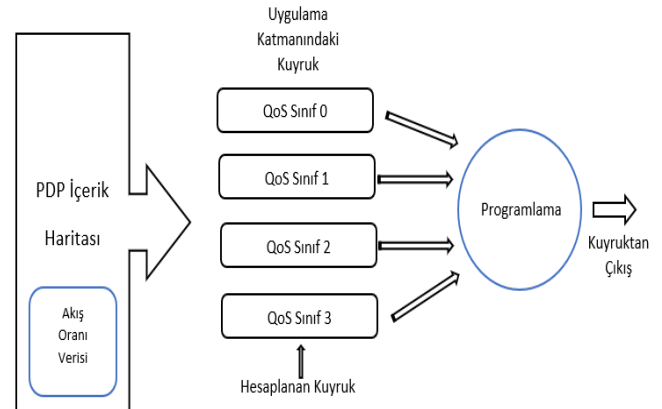


Şekil 1. LTE Ağ Mimarisi

SGW'nin ana işlevi, LTE düğümleri arasında kullanıcı veri paketlerini yönlendirmek ve diğer 3GPP teknolojileri arasında geçişi yönetmektir. PGW, LTE ağını Internet'in geri kalanıyla birbirine bağlayan bir fonksiyona sahiptir. LTE erişim ağı UE (son kullanıcı) ve eNodeB (baz istasyonu) olarak iki tür düğüm barındırır.

3.2. P-GW Düğümü

Ağ yönetimi için güvenlik ve kolaylık sağlamak amacıyla, yalnızca üçüncü katmanla ilgili olan geleneksel İnternette farklı olarak, P-GW, 3GPP'nin LTE' ye eriştiği sahnede uygulama katmanı protokolü olarak GTPv2'yi kullanarak uygulama katmanı protokolünü içerir. SAE, ve her kullanıcı için S5 / S8 arayüzünde Paket Veri Protokolü (PDP) ile iletişim kurar [22]. Harici ağdan veri akışı P-GW düğümüne girdiğinde, servis veri paketinin hangi kullanıcıya gönderileceğini ve hangi servis veri paketinin gönderileceğini belirleyen PDP içerik taraması yapmaktadır. Burada, kuyruk yönetimi elde etmek için uygulama katmanına taşınır. Uygulama Katmanı Kuyruk Yönetim Algoritması Şekil 2' de gösterilmektedir. Uygulama katmanında, düşük paket önce PDP içerik eşlemesini gerçekleştirir ve bu grubun QoS Sınıf Tanımlayıcı (QoS Class Identifier) (QCI) 'sini belirler ve sonra grupları farklı QCI'ye göre farklı sıralara yerleştirir. [27].

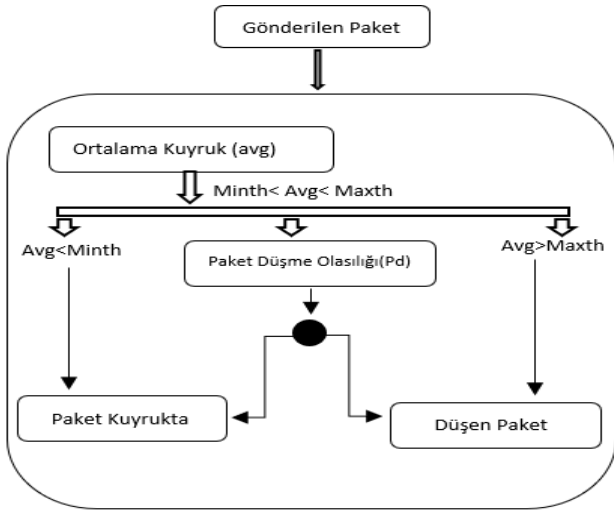


Şekil 2. Uygulama Katmanı Kuyruk Yönetim Algoritması

3.3. Aktif Kuyruk Yönetim Algoritmaları

RED (Random Early Detection), Floyd ve arkadaşları tarafından ortaya konulan ilk AQM algoritma çalışmasıdır. RED paket anahtarlamalı ağlarda tıkanıklıktan kaçınmak için ortalama kuyruk büyüklüğünü kullanarak ağ tıkanıklığını hesaplamaya çalışır [28]. RED algoritması, kuyruk boyutunu dört parametre ile yönetmektedir. Bu parametreler kuyruk uzunluğu, maksimum eşik (Maxth), minimum eşik (Minth), ve maksimum olasılık (Pmax). Algoritma, ortalama bir kuyruk büyüklüğünü korumaya yönelik çalışmaktadır. Paket düşme olasılık değeri (Pd), Minth ile Maxth değerleri arasında bulunan ortalama kuyruk büyüklük değişimi ile sıfır değeri ile Pmax değeri arasında doğrusal olarak değişim göstermektedir. Ortalama kuyruk boyut değeri Maxth'ı aşarsa, gelen tüm paketler düşürülmektedir [29]. RED algoritması, paket düşmesi

nedeniyle oluşan tıkanıklık yapısını kontrol edebilmektedir, çünkü paket düşürme mekanizması, geçmiş değerlerin hareketli ortalamasına göre işlem yapmaktadır.



Şekil 3. RED Algoritmasının Akış Diyagramı

Ağdaki darboğaz problemini çözmek için geliştirilen CoDel (Controlled Delay), Nichols ve Jacobson tarafından ortaya konuldu. Tamponlara gelen paketler normal koşullar altında tıkanıklık durumunda düşürülmekte ancak tamponun yüksek boyutlu olması durumunda sürekli kuyruğa eklenen paketler, paket gecikmesine neden olmaktadır [30].

RED ve CoDel algoritmaları bağlantı kullanımı, verim ve adalet karmaşıklığı performansları bakımından karşılaştırılmıştır. RED'in aksine CoDel kuyruk büyüklüğü ve ortalaması, kuyruk gecikmesi ve düşme oranı gibi parametrelerden bağımsızdır. CoDel, paket gecikmesi süresini kullanarak ağdaki tıkanıklığı tespit eder. Paket iletim süresi belirlenen hedef değeri aştığında CoDel tarafından tıkanıklık tespit edilir. Tıkanıklığın tespitinden sonra kuyruktaki yığılmayı önlemek için paket düşürülmesi amacıyla sinyal gönderilir [31].

pFIFO (Packet limited First In, First Out queue), FIFO algoritması temel alınarak oluşturulmuş bir aktif kuyruk yönetim algoritmasıdır. Ağ trafiği için farklı kanallar göz önüne alınarak sınıflandırılır. Yüksek öncelikli trafik daha önce işlenmektedir. Temel amacı farklılaştırılmış hizmet sınıflarının desteklenmesi amacıyla basit bir yöntem olarak tasarlanmıştır [32]. pFIFO'nun avantajı düşük hesap yükleri ve gerçek zamanlı uygulamalar da üretilen trafik iletimidir. En önemli problemlerinden birisi çok fazla sayıda yüksek öncelikli trafik bulundurmasıdır. Ağdaki en önemli problem yüksek öncelikli trafiğin hacminin fazla olması, düşük öncelikli trafik için ayrılan tampon alanının azalması ve taşmanın meydana gelmesidir. Bu durum ağda paket düşmesine ve ağın yavaşlamasına sebep olmaktadır.

PIE (Proportional Integral Controller Enhanced) (Geliştirilmiş Orantılı Entegre Kontrolör), ağdaki gecikmeyi

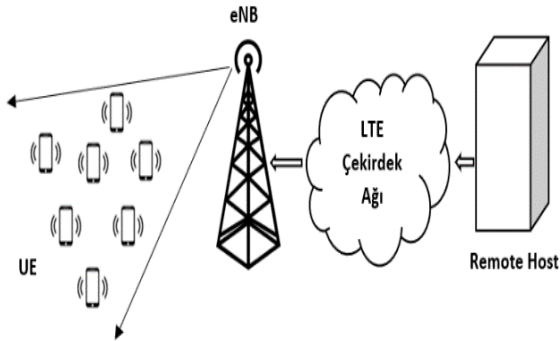
etkili bir şekilde kontrol etmek için tasarlanmıştır. PIE' de ortalama kuyruğa girme oranı, hareket halinde olmayan kuyruğa göre tahmin edilir. Hız, mevcut gecikmeyi hesaplamak için kullanılmaktadır. Daha sonra, periyodik olarak gecikme, düşme olasılığını hesaplamak için kullanılır. Son olarak, paket hedefe vardığında, bu olasılığa göre bir paket düşürülür (veya işaretlenir). PIE, gecikme eğilimine bağlı olarak olasılıkta ayarlamalar yapar. Alfa ve beta, düşme olasılığı artışını kontrol etmek için seçilen statik olarak seçilmiş parametrelerdir ve kontrol teorik yaklaşımları ile belirlenir. Alfa, mevcut ve hedef gecikme arasındaki sapmanın olasılığı nasıl değiştirdiğini belirler. Beta, gecikme eğilimine bağlı olarak ek ayarlamalar yapmaktadır. PIE zamana duyarlı performansını artırmak için tasarlanmıştır ve yüksek bağlantı kullanımını korurken etkileşimli trafik ve ağ istikrarı sağlamaya çalışmaktadır [33]. Kontrol parametrelerini küçük artışlarla uyarlayarak, dengesizliğe yol açan büyük salınımlardan kaçınılmasını sağlamaktadır.

4. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

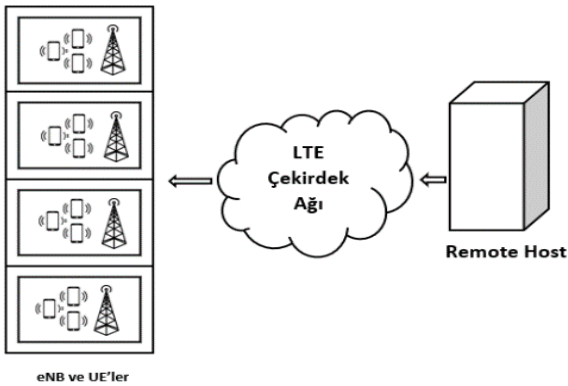
Bu bölümde, LTE ağı için ağ topolojisi ve sistem parametreleri belirlendikten sonra uçtan uca ortalama verim, gecikme ve paket kaybı açısından simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir.

4.1. Ağ Topolojisi ve Sistem Parametresi

Ağdaki trafiği deneysel olarak gözlemlemenin en kolay ve en etkili yollarından biri simülasyon yöntemidir. Bu yöntemle ağ düğümleri, bağlantılar ve ağ trafiği gerçek dünyaya benzer olacak şekilde tasarlanarak farklı durumların simülasyonları kolayca yapılabilir. OPNET, OMNET++ gibi simülatörlerle karşılaştırıldığında eğitim ve araştırma amaçlı kullanım amacıyla geliştirilen Ns3, GNU ve GPLv2 lisansları altında kullanılan ücretsiz açık kaynak kodlu ayrık olay tabanlı performansı ile önce çıkan bir yazılımdır [34]. Bu sebeple kullanılan algoritmalara ait karşılaştırmaları göstermek için çalışmamızda Ns3 simülatörü kullanılmıştır. Uçtan uca LTE ağı oluşturmak için LTE / EPC Network Simulator ve Analysis (LENA) modülünü [35] kullanılmıştır. LENA modülü, EPC ve Evolved E-UTRA dahil olmak üzere gerçek bir LTE sisteminin tüm önemli öğelerine sahiptir. Ns3'teki LTE modeli, uyarlamalı modülasyon ve kodlama, Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) (OFDMA), Hibrit Otomatik Tekrar İsteği (Automatic Repeat Request) (ARQ) vb. gibi LTE standardının çeşitli yönlerinin ayrıntılı bir şekilde uygulanmasını sağlar. Ns3 uygulaması, 3GPP LTE'nin ve çeşitli TCP sürümlerinin ayrıntılı özelliklerini kapsamaktadır. Bu nedenle, simülasyonda elde edilen sonuçlar gerçek bir sistemde neler olduğunu temsil edebilmektedir. LTE ağlarında Şekil 4'te gösterildiği gibi önce tek hücreli veya Şekil 5'de gösterildiği gibi çok hücreli çok kullanıcı bir ağ yapısı oluşturulmaktadır.



Şekil 4. Tek Hücreli LTE Ağ Topolojisi



Şekil 5. Çok Hücreli LTE Ağ Topolojisi

Bu çalışmada gerçek duruma uygun bir LTE ağ yapısının oluşturulabilmesi için çok hücreli çok kullanıcı bir ağ yapısı seçilmiştir. Böylece elde edilen veriler gerçek sisteme daha çok benzemektedir. Deneysel ortam için, 3 eNodeB (baz istasyonu) ve sırasıyla 10, 20, 30 ve 40 UE (mobil kullanıcı) bir sistem kurgulanmıştır. Her bir kullanıcı sayısı için RED, CoDel, PIE ve pFIFO algoritmaları ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar da her bir aktif kuyruk yönetim algoritması; ortalama uçtan uca verim, ortalama uçtan uca gecikme ve paket kayıp oranları bakımından teker teker karşılaştırılmıştır. Simülasyon ortamı için Tablo 1'deki simülasyon değeri kullanılmıştır.

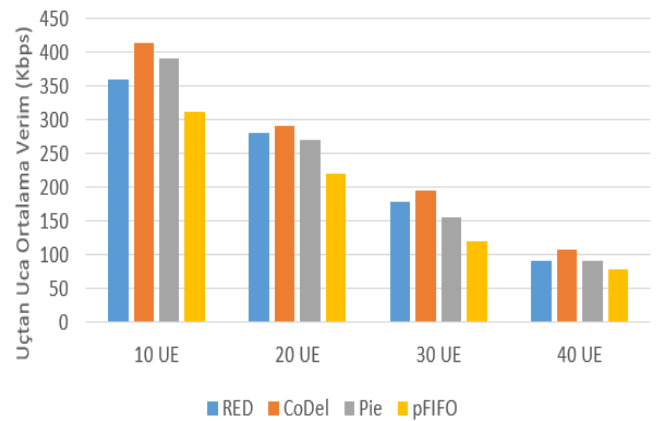
Tablo 1. Simülasyon Değerleri

Simülasyon Parametresi	Değer
Trafik Kaynağı Sayısı	10-40
Veri Hızı	100 Gbps
TCP Trafik Tipi	TcpNewReno
Handover/Devretme Algoritması	A3Rsrp
Hareketlilik Tipi	RandomWalk2D
Toplam Simülasyon Zamanı	100 sn
Simülasyon Başlama Zamanı	0.1 sn
Ağ Topolojisi	Çoklu Hücre
eNodeB arası Mesafe	250 m

Simülasyon ortamı için önce 3 eNodeB ve 10 adet UE sisteme rasgele olarak yerleştirilmiştir. eNodeB'ler birbirine X2 arayüzü ile bağlanmıştır. Ve UE'lerin hareketi esnasında eğer bir hücre yer değiştirme olursa, bu değişimle ilgili varsayılan olarak A3Rsrp algoritması çalışmaktadır. Her bir eNodeB'nin arası 250 metre olarak belirlenmiştir. Simülasyonda TCP trafiği için, en çok tercih edilen ve performans olarak etkili olan TcpNewReno varsayılan olarak çalışmaktadır. Simülasyonda veri trafiği 0.1 saniyeden itibaren başlamakta ve simülasyon 100 saniye sürmektedir. UE'lerin sayısı sırasıyla 20, 30 ve 40 olacak şekilde artırılmakta ve her bir yeni durum için elde edilen sonuçlar grafiksel olarak gösterilmektedir.

4.2. Uçtan Uca Ortalama Verim

Şekil 6'da aktif kuyruk yönetim algoritmalarının çalıştırılması ile elde edilen uçtan uca ortalama verim değerinin kullanıcı sayısına göre değişimi gösterilmiştir. 10 mobil kullanıcı ile simülasyona başlanmış ve kullanıcı sayısı onar onar artırılmıştır. 3 eNodeB için 10 kullanıcı bir simülasyon ortamı ile elde edilen değerler yüksek iken, kullanıcı sayısının artması ile elde edilen ortalama uçtan uca çıkış verimi değerleri doğal bir azalma göstermiştir. CoDel algoritması, yüksek kullanıcı grupları arasında uçtan uca verim değeri açısından en iyi performansı göstermiştir. Sırasıyla diğer en iyi performansı veren algoritmalar, RED, Pie ve pFIFO olarak sıralanmaktadır. CoDel algoritması, paket düşüşlerinin erken tespiti ve paketlerin kuyruğa girme süresine göre işlem yapması sebebiyle en iyi sonucu verir. Kuyruk dolduktan sonra gelen paketleri bırakan pFIFO algoritması, tüm algoritmalar arasında en kötü sonucu verdi. Bu pFIFO'nun yüksek trafik için en savunmasız algoritma olduğunu göstermektedir.

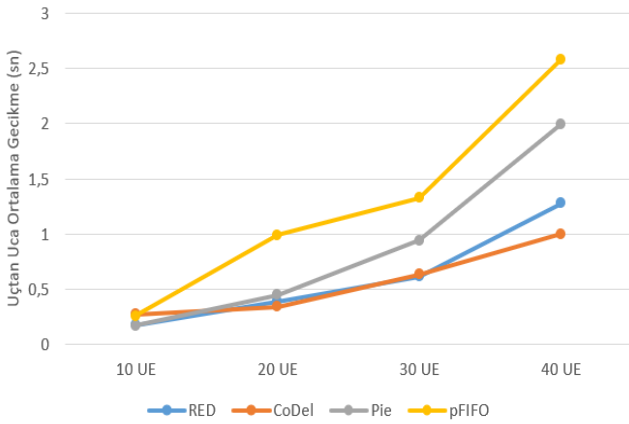


Şekil 6. Uçtan Uca Ortalama Verimin Karşılaştırılması

4.3. Uçtan Uca Ortalama Gecikme

Şekil 7, kullanıcının sayısına göre uçtan uca ortalama gecikme sürelerini göstermektedir. Uçtan uca gecikmeyi, PG-W yönlendiricisinden eNodeB düğümüne gelen paketlerdeki modülasyon, kodlama, paket oluşturma süresi gibi parametreler uçtan uca gecikmeyi önemli ölçüde etkilemektedir. CoDel, kuyruğu yönetmek için kuyruğun

boyutunu kullanmaz, paketlerin kuyruğa girme süresini kullanır. Bu da CoDel algoritmasının paket düşürme değerinin az olmasını ve buna bağlı olarak da uçtan uca verim değerinin diğer algoritmalara göre yüksek olmasını sağlamaktadır çünkü fazla paket düşürülmesi sistemin çıkış değerini olumsuz etkilemektedir. CoDel algoritması en düşük paket kaybı oranına sahip olmasıyla, uçtan uca verimde en iyi performansı göstermektedir. Sırasıyla bu algoritmayı RED, Pie ve PFIFO takip etmektedir.



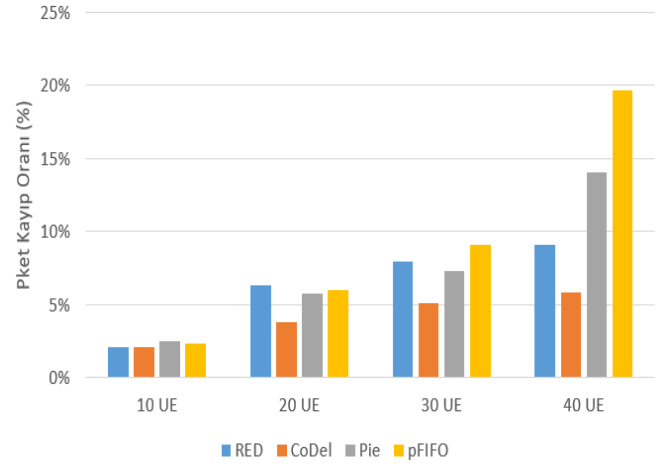
Şekil 7. Uçtan Uca Ortalama Gecikmelerin Karşılaştırılması

4.4. Paket Kayıp Oranı

Şekil 8, kullanıcının sayılarına göre paket kayıp oranlarını göstermektedir. Paket kaybının fazla yaşanması paket kaybının telafisi için geçirilen süreler ve sistemin tekrar kararlı hale gelmesi gibi nedenlerden dolayı LTE ağlarında performansın olumsuz olarak etkilenmesine neden olmaktadır. Paket kayıp oranlarına bakıldığında PFIFO algoritması tüm kullanıcı gruplarında en yüksek paket düşürme değerine sahip olmasıyla, ağ performansını olumsuz yönde etkileyen algoritmadır. CoDel, tüm kullanıcı gruplarında en düşük paket kayıp oranı ile en güçlü aktif yönetim algoritması olarak öne çıkmaktadır.

CoDel, tüm simülasyon sonuçlarına göre, ortalama uçtan uca verim, ortalama uçtan uca gecikme ve paket oranı ile en güçlü aktif kuyruk yönetim algoritması olarak çalışmaktadır. Sırasıyla CoDel'i RED, Pie ve PFIFO izlemektedir. RED'in kuyruğa almadaki problemi, farklı boyutlarda ağ bant genişlikleri için parametrelerin ayarlanmasına ihtiyaç duymasındır, CoDel ise bu problemi çözmektedir. CoDel, ayarlarının değiştirilmesine gerek kalmadan herhangi bir bant genişliği boyutu aralığında iyi çalışır. CoDel, kuyruğu yönetmek için kuyruğun boyutunu kullanmaz, paketlerin kuyruğa girme süresini kullanır. Hedef adlı bir kuyruk süresi belirler ve kuyruk süresi bu hedefin altına düştüğünde paketleri düşürmez. RED algoritmasının güçlü yönü ise paket düşürürken kuyruk uzunluğunu kontrol eder ve minimum ve maksimum değerler arasında bulunan eşik değerine göre paketi düşürüp düşürmeyeceğine karar verir. Bu yönüyle CoDel'den sonra RED en iyi sonucu üretmektedir. PFIFO ve Pie kuyruk doluluğunu referans

alması sebebiyle daha basit bir kontrol mekanizması ile çalışmaktadır.



Şekil 9. Paket Kayıp Oranlarının Karşılaştırılması

5. SONUÇ

LTE ağlarında, PG-W düğümünden eNodeB'ye gelen paketlerin tamponda birikmesi sebebiyle sistemde darboğaz yaşanmaktadır. LTE ağlarının yükünün artmasıyla uçtan uca verim, gecikme ve paket düşürme değerleri olumsuz yönde etkilenmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre en başarılı algoritma CoDel algoritmasıdır. Sırasıyla RED, Pie ve PFIFO bu algoritmayı takip etmektedir. CoDel, ayarlarının değiştirilmesine gerek kalmadan herhangi bir bant genişliği boyutu aralığında iyi çalışır. CoDel, kuyruğu yönetmek için kuyruğun boyutunu kullanmaz, paketlerin kuyruğa girme süresini kullanır. Bu da CoDel paket düşürme değerinin az olmasını ve buna bağlı olarak da uçtan uca verim ve gecikme değerlerinin az olmasını sağlamaktadır. RED algoritması paket düşürürken ortalama kuyruk değerini hesaplar ve bu değer minimum ve maksimum eşik değerleri arasında olduğu sürece paket düşürülmesine izin vermez ancak RED algoritması yüksek yük durumlarında maksimum eşik aşılsa tüm paketleri düşürebilir bu da sistem performansına olumsuz olarak etkileyebilir. Pie ve PFIFO algoritmaları ise paket düşürülmesi için kuyruk uzunluklarını referans alır bu ise sınırlı kaynakların olduğu bir sistemde elverişli bir yöntem değildir.

KAYNAKÇA


- [1] Cisco and S. Jose, "Cisco visual networking index (VNI) global mobile data traffic," Ca, Usa, pp. 3–5, 2019, [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.html>.
- [2] S. Y. Hui and K. H. Yeung, "Challenges in the Migration to 4G Mobile Systems," IEEE Commun. Mag., vol. 41, no. 12, pp. 54–59, 2003, doi: 10.1109/MCOM.2003.1252799.
- [3] D. Astély, E. Dahlman, A. Furuskär, Y. Jading, M. Lindström, and S. Parkvall, "LTE: The evolution of mobile

- broadband," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 4, pp. 44–51, 2009, doi: 10.1109/MCOM.2009.4907406.
- [4] M. Çakmak and Z. Albayrak, "A Review: Mobile Communication Past, Present and Future," 2018 International Conference on Advanced Technologies, Computer Engineering and Science (ICATCES), pp. 141–145, 2018.
- [5] M. Rinne and O. Tirkkonen, "LTE, the radio technology path towards 4G," *Comput. Commun.*, vol. 33, no. 16, pp. 1894–1906, 2010, doi: 10.1016/j.comcom.2010.07.001.
- [6] C. Applications, "an Active Queue Management," vol. 14, no. 1, pp. 65–72, 2009.
- [7] Santhi V. and Natarajan A.M., "Performance Analysis of Active Queue Management Algorithms," *Inf. Sci. Comput.*, vol. 3, no. 1, pp. 230–232, 2009, [Online]. Available: http://journals-sathyabama.com/archives/iisc_abstract.php?id=36.
- [8] B. Qureshi, M. Othman, S. Subramaniam, and N. A. Wati, "QTCP: Improving Throughput Performance Evaluation with High-Speed Networks," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 38, no. 10, pp. 2663–2691, 2013, doi: 10.1007/s13369-012-0483-z.
- [9] P. J. Argibay-Losada, K. Nozhnina, A. Suárez-González, C. López-García, and M. Fernández-Veiga, "Loss-based proportional fairness in multihop wireless networks," *Wirel. Networks*, vol. 20, no. 5, pp. 805–816, 2014, doi: 10.1007/s11276-013-0644-3.
- [10] N. Iya, N. Kuhn, F. Verdichio, and G. Fairhurst, "Analyzing the impact of bufferbloat on latency-sensitive applications," *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 2015-Septe, no. ii, pp. 6098–6103, 2015, doi: 10.1109/ICC.2015.7249294.
- [11] L. S. Brakmo and L. L. Peterson, "TCP Vegas: End to End Congestion Avoidance on a Global Internet," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 13, no. 8, pp. 1465–1480, 1995, doi: 10.1109/49.464716.
- [12] A. Abdelsalam, M. Luglio, C. Roseti, and F. Zampognaro, "TCP Wave: A new reliable transport approach for future internet," *Comput. Networks*, vol. 112, pp. 122–143, 2017, doi: 10.1016/j.comnet.2016.11.002.
- [13] S. Mascolo, C. Casetti, M. Gerla, M. Y. Sanadidi, and R. Wang, "TCP Westwood: Bandwidth estimation for enhanced transport over wireless links," *Proc. Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Networking, MOBICOM*, pp. 287–297, 2001.
- [14] S. Floyd and V. Jacobson, "Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 1, no. 4, pp. 397–413, 1993, doi: 10.1109/90.251892.
- [15] M. P. Tahliliani, K. C. Shet, and T. G. Basavaraju, "CARED: Cautious Adaptive RED gateways for TCP/IP networks," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 35, no. 2, pp. 857–864, 2012, doi: 10.1016/j.jnca.2011.12.003.
- [16] S. Floyd, "TCP and explicit congestion notification," *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 24, no. 5, pp. 8–23, 1994, doi: 10.1145/205511.205512.
- [17] M. Casoni, C. A. Grazia, M. Klapez, and N. Patriciello, "How to avoid TCP congestion without dropping packets: An effective AQM called PINK," *Comput. Commun.*, vol. 103, pp. 49–60, 2017, doi: 10.1016/j.comcom.2017.02.010.
- [18] C. Control, "BBR: Congestion-Based," *Commun. ACM*, vol. 60, no. 2, pp. 58–66, 2017, doi: 10.1145/3009824.
- [19] K. Nichols and V. Jacobson, "Controlling queue delay," *Queue*, vol. 10, no. 5, pp. 1–15, 2012, doi: 10.1145/2208917.2209336.
- [20] A. Lakshmikantha and G. Engineering, "Real and Virtual Queue based Active Queue Management Schemes," pp. 266–271.
- [21] D. J. Byun and J. S. Baras, "Adaptive virtual queue random early detection in satellite networks," *Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 44 LNEE, pp. 63–82, 2009, doi: 10.1007/978-0-387-71787-6_4.
- [22] Q. L. Qiu, C. Jian, L. Di Ping, and X. Z. Pan, "Hierarchy virtual queue based flow control in LTE/SAE," 2nd Int. Conf. Futur. Networks, ICFN 2010, no. 2008, pp. 78–82, 2010, doi: 10.1109/ICFN.2010.8.
- [23] A. Paul, H. Kawakami, A. Tachibana, and T. Hasegawa, "Effect of AQM-Based RLC Buffer Management on the eNB Scheduling Algorithm in LTE Network," *Technologies*, vol. 5, no. 3, p. 59, 2017, doi: 10.3390/technologies5030059.
- [24] A. N.D. and R. A., "Avoiding queue overflow and reducing queuing delay at eNodeB in LTE networks using congestion feedback mechanism," *Comput. Commun.*, vol. 146, no. May, pp. 131–143, 2019, doi: 10.1016/j.comcom.2019.07.015.
- [25] G. Gómez, Q. Pérez, J. Lorca, and R. García, "Quality of service drivers in LTE and LTE-A networks," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 75, no. 2, pp. 1079–1097, 2014, doi: 10.1007/s11277-013-1409-0.
- [26] B. Clerckx, A. Lozano, S. Sesia, C. van Rensburg, and C. Papadias, "3GPP LTE and LTE-Advanced," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2009, no. 1, p. 472124, 2009, doi: 10.1155/2009/472124.
- [27] F. Cheng, X. Hang, and H. Lei, "A Congestion Control Scheme for LTE / SAE," vol. 51, no. Iccsit 2011, pp. 400–405, 2012, doi: 10.7763/IPCSIT.2012.V51.67.
- [28] S. Floyd and V. Jacobson, "Random Early Detection for Congestion Avoidance," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 1, no. 4, pp. 397–413, 1993.
- [29] F. B. Dergisi, "Evaluation of Active Queue Management," pp. 123–140, 2005.
- [30] A. Arora, L. Bhambhu, and I. I. C. Management, "Evaluation of Active Queue Management Algorithms," vol. 2, no. 4, pp. 197–203, 2014.
- [31] M. Çakmak and Z. Albayrak, "A Review: Active Queue Management Algorithms in Mobile Communication", 2018 International Conference on Advanced Technologies, Computer Engineering and Science (ICONCS), pp. 180–184, 2018.
- [32] M. M. Hamdi, S. A. Rashid, M. Ismail, M. A. Altahrawi, M. F. Mansor, and M. K. Abufoul, "Performance Evaluation of Active Queue Management Algorithms in Large Network," *ISTT 2018 - 2018 IEEE 4th Int. Symp. Telecommun. Technol.*, no. May 2019, 2018, doi: 10.1109/ISTT.2018.8701716.

- [33] K. S. Shravya, S. Murali, and M. P. Tahiliani, "Implementation and evaluation of Proportional Integral Controller Enhanced (PIE) algorithm in ns-3," *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, vol. Part F1321, pp. 9–16, 2016, doi: 10.1145/2915371.2915385.
- [34] Z. Albayrak and, C. Torun "Recent LTE Simulation Tools," *International Conference on Engineering and Natural Sciences*, pp. 2007–2014, 2016.
- [35] G. Piro, N. Baldo, and M. Miozzo, "An LTE module for the ns-3 network simulator," *Proc. 4th Int. ICST Conf. Simul. Tools Tech.*, 2011, doi: 10.4108/icst.simutools.2011.245571.

Theoretical and Experimental Investigation of Carbon Monoxide, Humidity and Temperature Relations in Zonguldak Province of Turkey

Caglar Celik Bayar

Zonguldak Bulent Ecevit University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 67100 Zonguldak/Turkey,
caglarbayar@gmail.com, caglarbayar@beun.edu.tr, 

Research Paper

Arrival Date: 04.02.2019

Accepted Date: 30.04.2020

Abstract

The sensor monitoring of ambient carbon monoxide (CO) which was mainly emitted by the coal mines and power plants was performed in the center of Zonguldak province of Turkey. It was observed that the recorded amount of CO (ppm) highly depended on the amount of humidity (H₂O) percent and temperature. The sensor monitored higher CO values at higher temperatures accompanied with lower humidity percent whereas lower CO values at lower temperatures accompanied with higher humidity percent. Consequently, OC...W_n (W: H₂O) (n = 1-3) long-range (hydrogen-bonding) interactions were modelled computationally using MP2/6-311++G(d,p) level of theory at selected temperatures. The calculated interaction Gibbs free energies and performed reactivity and stability analyses supported the possibility of carbon monoxide and humidity interactions at lower temperatures with higher humidity percent in parallel with the experimental results. It was concluded that the system presented in this study might be integrated into CO sensor units to improve the sensor response in terms of accuracy and precision.

Keywords: carbon monoxide, humidity, sensor monitoring, computational modeling, MP2

1. INTRODUCTION

The present study includes the monitoring of CO gas with sensors and modeling of its possible interactions with water (humidity) molecules. Therefore, the types of sensors and their characteristics, the general properties of CO gas and its effects on our health and the previous studies about CO-water interactions reported in the literature were presented at the beginning of this section.

Air pollution is one of the main causes of acute and chronic diseases. The pollutants in the atmosphere are predominantly particles and gases such as nitrogen dioxide (NO₂), ozone (O₃) and carbon monoxide (CO) [1]. Compact, low-cost and portable gas sensors are highly preferable in the field of ambient air quality monitoring [1-4]. These sensors have different working principles according to their types. For instance, photo-ionization based sensors are generally used for detecting volatile organic compounds [1,5]. Carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) gases can be detected by optical sensors which are based on measuring gas absorption at a specific infrared wavelength [1,6]. Semi conductive metal oxide sensors work on the basis of changes in conductivity when they are in contact with pollutant gas molecules [1,7]. Oxidation/reduction reactions that occur on the electrodes of electrochemical sensors result in change in current and help in detecting several of the gas pollutants [1,8,9]. However, the data quality of sensor monitoring is highly affected from environmental factors such as temperature, humidity and interference of other air pollutants

[1,4,8,10]. Machine learning methods are used and still in progress in order to overcome these problems.

CO is an important air pollutant. It is a gas with no color, odor and taste. It is predominantly produced from the incomplete combustion of fossil fuels. The other sources of CO are natural gas, volcanoes, open fires and metabolism of marine organisms. It is a toxic gas. As hemoglobin (Hb) (the oxygen transport protein contained in the red blood cells) has about 220 times more affinity for CO than it does for oxygen, a rapid poisoning of red blood cells occurs when the body is exposed to a high concentration of CO. The COHb concentration should not exceed a recommended universal level of 2.5%. High levels of CO exposure can cause acute poisoning, leading the coma and death at COHb levels of greater than 40% [11].

Atmospheric CO level is highly affected by the amount of humidity. There exist different studies on this subject in the literature. The OC...H₂O complex was firstly observed experimentally in solid argon [12]. Rotational transitions for this structure and its different isotopic versions were investigated using the molecular beam electric resonance and Fourier transform microwave absorption techniques [13]. The combination of the supermolecular Møller-Plesset scheme with the perturbation theory of intermolecular forces was applied in the analysis of the potential energy surface of OC...H₂O [14]. Additionally, various density functional methods and local and nonlocal exchange-correlation functionals were used in the investigation of the structure,

*Corresponding Author: Zonguldak Bulent Ecevit University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 67100 Zonguldak/Turkey, caglarbayar@gmail.com, caglarbayar@beun.edu.tr

energetics and vibrational properties of the same complex [15].

The present study was performed in Zonguldak province of Turkey. It is located in the western Black Sea region of the country. The specific geographic property of Zonguldak center is that the transition between the temperatures in the winter months is soft while that of the humidity percentages are quite hard. It is a major mining center of Turkey and CO emissions from the coal mines to the atmosphere reach very high values. In addition, there are many power plants near the city center which use coal as a fuel and release a significant amount of CO into the environment. These CO emissions pose a serious threat to the city and therefore need to be measured correctly. In a region with such characteristics, first the humidity and then the temperature as a humidity drier were considered to be very important factors on carbon monoxide sensors. In this perspective, the relationship between CO level-humidity and CO level-temperature were examined by sensor monitoring in February in Zonguldak center. The month of February was chosen for collecting experimental data because of hard humidity percent transitions in winter months. The experimental records were then computationally modeled taking into account long-range interactions of carbon monoxide and humidity at selected temperatures which were demonstrated as $OC...W_n$ throughout the study (OC: Carbon monoxide interacting from carbon side, W: H_2O : Humidity, $n = 1-3$). The previous studies mostly focused on structural

analysis of $OC...H_2O$ complex as mentioned earlier. Such a study consisting of both sensor monitoring and computational modeling of CO-humidity interactions does not exist in the literature. Thus, the originality of the study is revealed.

2. MATERIALS AND METHOD

2.1. Experimental Monitoring

The experimental setup included a semi conductive metal oxide CO sensor with MQ-7 brand (Figure 1) to record atmospheric CO levels in ppm and a BME280 branded sensor (Figure 2) to record pressure (hPa), temperature ($^{\circ}C$) and humidity (%) changes. Data coming from these sensors were decoded by the use of a 10-bits Atmel based microprocessor. An Ethernet shield was coupled with the microprocessor (Figure 3) to save the real time data coming from these sensors into a SD card. Note that Figures 1-3 show the original pictures of the purchased items. The working frequency of the experimental setup was adjusted to 1 Hz. The sensor data was collected for a week without any interruptions. C-Based programming language was used to create algorithms. Open source libraries provided by the manufacturers of the sensors were integrated into the program.

MQ-7 branded sensor is often used to detect CO levels in industry and car automation setups. It works with 5V DC



Figure 1. The picture of a semi conductive metal oxide CO sensor with MQ-7 brand.



Figure 2. The picture of a BME280 branded pressure-temperature-humidity sensor.



Figure 3. The picture of microprocessor (bottom component) and Ethernet shield (top component) together.

voltage and sends its data by analog resistance. The detecting range is between 20 ppm-2000 ppm CO. The sensitivity of the load resistance is $10\text{ k}\Omega \pm 5\%$.

BME280, manufactured by Bosch, is an environmental sensor. It provides temperature, barometric pressure and humidity information. Sharp changes of environmental conditions and weather/environmental sensing can be monitored using this sensor. It has the capability of communicating with the microprocessor over I2C or SPI (I2C communication protocol was used to get fast and accurate conversion in the experimental setup). This low-

cost sensor can measure humidity with $\pm 3\%$ accuracy. Temperature and barometric pressure can be sensed with the accuracies of $\pm 1^{\circ}C$ and $\pm 1\text{ hPa}$, respectively. It needs 5V DC power to work. It was programmed to send its data in each second in the experimental setup.

The graphs of time versus recorded temperature, pressure, humidity and CO level were presented in Figure 4. It was detected that the atmospheric pressure almost stayed at around 1.00 atm. during the measurements when the recorded pressures in hPa were converted to atm. Therefore, pressure was not taken as a variable, was considered as a

constant, both in experimental monitoring and computational modeling. The data collected all fluctuated in Figure 4 which denoted a reasonable time interval was needed to reach equilibrium and obtain more reliable results. Table 1 presented the minimum, intermediate and maximum CO levels and other related values obtained from Figure 4. The data in Table 1 was interpreted like this: At the minute of 100 the minimum CO level was measured as 30 ppm at 6 °C with the atmospheric humidity of 68 %. Approximately 8 hours later (at the minute of 600), the temperature increased to 11 °C and dried the humidity to 54 %. The level of free atmospheric CO increased to 55 ppm with decrease in humidity. Then, approximately 6 hours later, at the minute of 980, the temperature increased to 14 °C and dried the humidity some more (52 %). At that point the free CO level reached its maximum value of 75 ppm. Another interpretation was like that: The increase of temperature from 6 to 11 °C ($\Delta t = 5$ °C) dried the humidity level 14 % and increased the free CO level 25 ppm. However, when the temperature increased from 11 to 14 °C ($\Delta t = 3$ °C), the humidity decreased 2% that resulted in 20 ppm increase in CO level. After these observations it was concluded that the amount of change in temperature (Δt) was an important factor in determining the humidity % and free CO levels. Regarding to that, in the cases of 6 and 14 °C in which Δt was 8 °C, humidity decrease was 16 % and increase in CO level was 45 ppm. These observations brought to mind that chemical interactions might take place between CO and

humidity (H_2O) molecules at lower temperatures accompanying with higher humidity. This was the main approach used in the computational modeling.

2.2. Computational Modeling

The interactions of CO gas with one, two and three water (humidity) molecules were modeled computationally. They were abbreviated as OC...W (CO molecule was interacting with one water molecule from carbon side), OC...W...W (OC...2W) (CO molecule was interacting with one water molecule from carbon side and the water molecule was interacting with another water molecule), OC...W...W...W (OC...3W) (similar to the previous one but there were three water molecules interacting with each other). All interactions were detected as long-range (hydrogen-bonding) interactions after calculations.

The initial structure optimizations leading to the energy minima were performed using the MM2 method followed by the semi-empirical PM3 self-consistent field molecular orbital (SCF-MO) method [16] and Hartree-Fock (HF) SCF-MO methods [17] at the restricted level. Further optimizations were performed within the framework of Second-order Moller-Plesset Perturbation Theory (MP2) at the restricted level of a 6-311++G(d,p) basis set (MP2/6-311++G(d,p)) [17]. All vibrational analyses and thermochemical calculations were performed using the same level of theory. The vibrational analyses had no imaginary

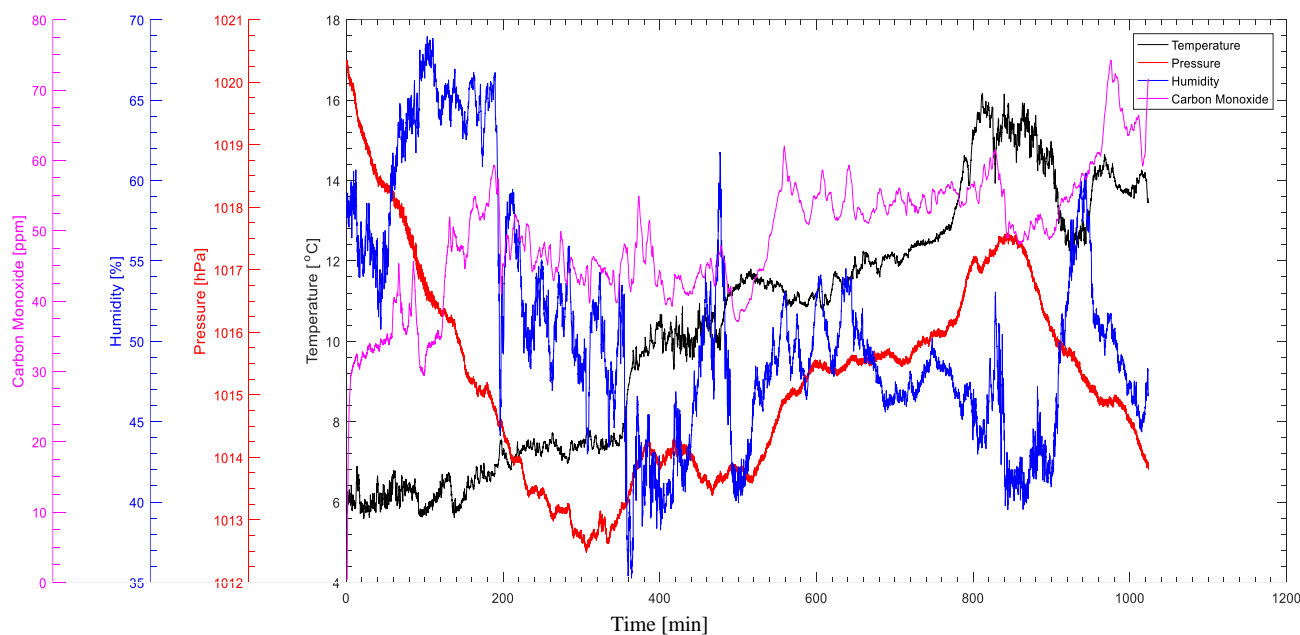


Figure 4. The graphs of time versus temperature (°C), pressure (hPa), humidity (%) and CO level (ppm).

Table 1. The minimum, intermediate and maximum CO levels and other related values obtained from Figure 4.

Time (min)	Temperature (°C)	Free CO (ppm)	Humidity (%)
100	6	30 ^a	68
600	11	55 ^b	54
980	14	75 ^c	52

^{a,c}The minimum and maximum values of CO recorded in time interval of approximately 15 hours.
^bAn intermediate value of CO recorded approximately after 8 hours than the first measurement.
 Atmospheric pressure was at around 1.00 atm.

frequencies, which indicated that no transition states or saddle points were observed on the potential energy surfaces. The interaction Gibbs free energies of all the considered long-range interactions were calculated at 6, 11 and 14 °C, respectively. Then, they were corrected with basis set superposition error (BSSE) contributions [18,19]. BSSE corrections use the Boys and Bernardi counterpoise technique [18,20], which are due to overlap of the wave functions of the moieties [21]. All of the computations were performed for the gas phase using the Gaussian 09 software package [22]. The atmospheric pressure was kept at 1.00 atm. during calculations.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Structure Optimizations

In OC...W (OC...H₂O) structure, the hydrogen bond between the two fragments, CO and H₂O (OC...H-O-H), was determined to be 2.41 Å with nonlinearity of 11.5° in the

literature [12,15]. Additionally, the higher stability of OC...W interaction rather than CO...W interaction was reported computationally [14] (Long-range interaction was from the C side in the previous structure, however it was from the O side in the latter). Similarly, the present study concentrated on the stable OC...W structure. The values calculated in the study were close to the ones reported in the literature. The hydrogen bond length in OC...W structure was found to be 2.45 Å accompanied by a nonlinearity of 10.8° at all temperatures.

The shapes of the optimized structures were similar at all temperatures of 6, 11 and 14 °C. Therefore, the representative temperature was chosen as 6 °C and the optimized structures of OC...W, OC...2W and OC...3W interactions were demonstrated at this temperature in Figure 5. All interactions had OC...H-O-H hydrogen bonds. In OC...2W and OC...3W interactions, water molecules were oriented to make additional hydrogen bonds between them.

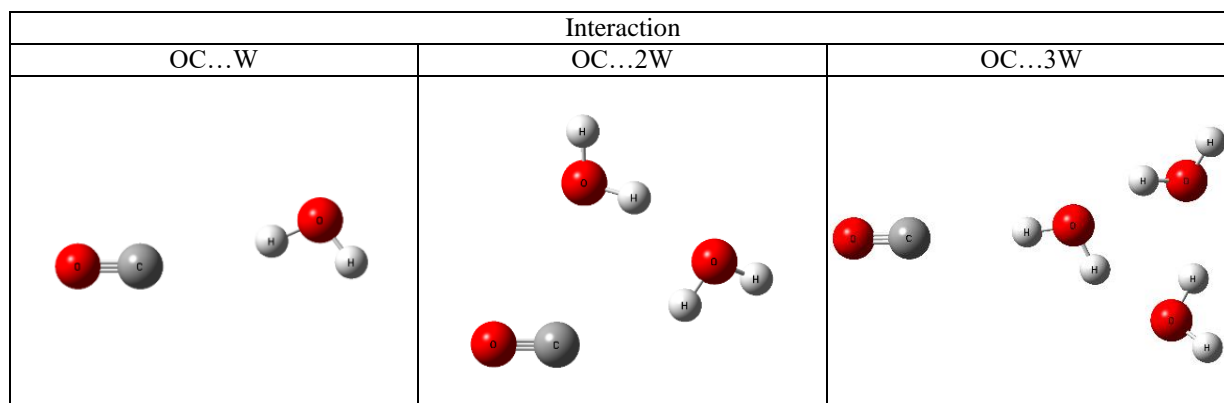


Figure 5. The representative optimized structures of OC...W, OC...2W and OC...3W interactions at the theoretical level of MP2/6-311++G(d,p) at 6 °C.

3.2. Computed Interaction Gibbs Free Energies and Relation with Sensor Monitoring

The interaction Gibbs free energies were formulated as in Equation (1):

$$\Delta G_{int}^o = \Delta G^o(OC \dots W_n) - [\Delta G^o(CO) + n \Delta G^o(W)], \quad (1)$$

$$n = 1 - 3$$

The BSSE corrected interaction Gibbs free energies of all the considered interactions were presented in Table 2. The following results were obtained from calculations: At any selected temperature the interaction Gibbs free energy was positive (non-spontaneous) and the energy order was OC...3W > OC...2W > OC...W. It denoted that the interaction got more difficult with increasing number of water. If the amount of water was increased from 1 mole to 2 moles (W was added to OC...W and OC...2W was

formed), an additional energy more than 20 kJ/mole was needed to perform the reaction at any temperature. However, when the mole number of water molecules were increased from 2 to 3, less energy was needed (3-4 kJ/mole) (W was added to OC...2W and OC...3W was formed at any temperature). Additionally, it needed more energy to perform OC...W_n interaction (n = 1-3) as temperature increased. This observation was parallel to the sensor monitoring result in which the concentration of free CO (non-bonding CO) increased with increasing temperature (with drying humidity).

3.3. The Frontier Molecular Orbital Analyses

The frontier molecular orbital analyses of the structures were performed using the orbitals of HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) and LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital). Absolute hardness (η), global softness (S), Mulliken electronegativity (X_M), electronic chemical potential (μ), electrophilicity index (ω) and $f_{H/L}$ index are important parameters to understand the chemical reactivity

and stability of the compounds. They are calculated by the Equations (2)-(6) given below.

$$\eta = \frac{(I - A)}{2} \quad [23,24] \quad (2)$$

$$S = \frac{1}{(2\eta)} \quad [24,25] \quad (3)$$

$$X_M = -\mu = \frac{(I + A)}{2} \quad [23,25] \quad (4)$$

$$\omega = \frac{\mu^2}{(2\eta)} \quad [25,26] \quad (5)$$

$$f_{H/L} = \frac{\varepsilon_{HOMO}}{\varepsilon_{LUMO}} \quad [27] \quad (6)$$

I and A are the ionization potential and electron affinity, respectively [23]. Note that $I = -\varepsilon_{HOMO}$ and $A = -\varepsilon_{LUMO}$ within the validity of the Koopmans' theorem [28], where ε_{HOMO} and ε_{LUMO} are the energies of the highest occupied molecular orbital and lowest unoccupied molecular orbital, respectively.

The calculated frontier molecular orbital energies and related reactivity and stability parameters of CO, W and OC...W_n (n = 1-3) structures at the theoretical level of MP2/6-311++G(d,p) were demonstrated in Table 3. According to the results it was concluded that W had a tendency to interact with CO as their absolute hardness and global softness values were close to each other. CO was a little bit harder than W ($\eta_{CO} = 0.32 \text{ eV}$, $\eta_W = 0.28 \text{ eV}$) and in parallel W was a little bit softer than CO ($S_W = 1.79 \text{ eV}^{-1}$, $S_{CO} = 1.56 \text{ eV}^{-1}$). It is important to note that hard-hard (soft-soft) interactions have more tendency to occur chemically than hard-soft interactions [29,30]. In this perspective, the interaction of OC...W with another W molecule (to form OC...2W) was also favored since the absolute hardness and

Table 2. Calculated interaction Gibbs free energies of CO molecule with different numbers of water molecule (humidity) at the selected temperatures. MP2/6-311++G(d,p) theoretical level was used in the calculations.

Interaction			
Temperature	OC...W	OC...2W	OC...3W
6	19.1	40.4	43.5
11	19.5	41.5	45.1
14	19.7	42.1	46.1

Temperatures are in °C.
 Energies are standard Gibbs free energies in kJ/mole and BSSE corrected.
 Atmospheric pressure was fixed at 1.00 atm. in computations.

Table 3. The calculated frontier molecular orbital energies and related reactivity and stability parameters of CO, W (water) and OC...W_n (n = 1-3) structures at the theoretical level of MP2/6-311++G(d,p).

	ε_{HOMO} (eV)	ε_{LUMO} (eV)	I (eV)	A (eV)	η (eV)	S (eV ⁻¹)	$X_M = -\mu$ (eV)	ω (eV)	$f_{H/L}$
CO	-0.56	0.083	0.56	-0.083	0.32	1.56	0.24	0.090	-6.75
W	-0.51	0.043	0.51	-0.043	0.28	1.79	0.23	0.094	-11.86
OC...W	-0.50	0.050	0.50	-0.050	0.28	1.79	0.23	0.094	-10.00
OC...2W	-0.49	0.042	0.49	-0.042	0.27	1.85	0.22	0.090	-11.67
OC...3W	-0.50	0.045	0.50	-0.045	0.27	1.85	0.23	0.098	-11.11

global softness values of OC...W and W were the same ($\eta = 0.28 \text{ eV}$, $S = 1.79 \text{ eV}^{-1}$ for both). Similarly, the interaction

of OC...2W with another W molecule (to form OC...3W) was possible when their closer η and S values were taken

into account ($\eta_W = 0.28 \text{ eV}$, $\eta_{OC...2W} = 0.27 \text{ eV}$, $S_W = 1.79 \text{ eV}^{-1}$, $S_{OC...2W} = 1.85 \text{ eV}^{-1}$).

Electrophilicity index (ω) defines the global electrophilic nature of a molecule relatively [31]. The molecule with higher ω acts as an electrophile (electron-poor specie) however the molecule with lower ω acts as a nucleophile (electron-rich specie). According to Table 3, it was concluded that CO acted as a nucleophile ($\omega = 0.090 \text{ eV}$) whereas W acted as an electrophile ($\omega = 0.094 \text{ eV}$) in OC...W interaction. However, OC...W and W had the same electrophilicity indexes ($\omega = 0.094 \text{ eV}$) in the formation of OC...2W interaction. Similar to OC...W interaction, OC...2W acted as a nucleophile ($\omega = 0.090 \text{ eV}$) while W acted as an electrophile ($\omega = 0.094 \text{ eV}$) in the formation of OC...3W interaction.

Molecules with high HOMO energy can donate their electrons more easily than molecules with low HOMO energy, and therefore they are more reactive in oxidation reactions. Molecules with low LUMO energy are more favored to accept electrons than molecules with high LUMO energy, and as a result they are more reactive in reduction reactions. This approach is used in describing the reactivity (stability) of the molecules [27]. The $f_{H/L}$ index is defined as a stability index of molecules through oxidation. It is the ratio between HOMO and LUMO energies. (Note that $f_{H/L}$ is a unitless index since it is just the ratio of the frontier molecular orbital energies having the same unit.) Molecules with low values of $f_{H/L}$ show persistent character to oxidation than molecules with high values of $f_{H/L}$ [27]. According to this phenomena, it was possible to remark that CO was the most suitable specie for oxidation ($f_{H/L} = -6.75$) whereas W was the least suitable one ($f_{H/L} = -11.86$). The OC...W_n (n = 1-3) species lied in between CO and W in terms of oxidizability (Table 3).

4. CONCLUSION

The major outcomes of this research can be listed according to the experimental (sensor monitoring) and computational (molecular modeling) studies as follows:

- Firstly, it would be better to mention that the results all belong to Zonguldak province of Turkey and may differ according to the location.
- The experimental sensor monitoring and OC...W_n (n = 1-3) computational modeling results correlated well with each other.
- Temperature and humidity % were found to be the main factors affecting carbon monoxide and humidity interactions.
- It was concluded that lower temperatures accompanied by higher humidity % were more favored for the interaction of carbon monoxide and humidity since humidity could not be dried sufficiently at lower temperatures.
- The possible OC...W_n (n=1-3) interactions were examined theoretically within the limitation of the method and basis set used. However the computational results may differ according to these parameters, a post Hartree-Fock

method of MP2 with 6-311++G(d,p) basis set allowed to make relative comparisons. On the other hand, the low-cost components of the experimental setup are generally used in research and developing prototypes. If they were replaced with the industrial versions in the present study, the results would be more improved.

f) The possible sources of error can be listed as follows: using low-cost sensors, sensor noise, the magnitude and direction of the wind (since the data was collected in open air), using a microprocessor with 10-bits analog to digital converter (ADC) (higher than 10-bits ADC would give better results).

g) The future work may include higher level theoretical calculations accompanied by data collections in more days of the year.

h) The CO-humidity modeling proposed in the present study may be integrated into next-generation CO sensors so as to improve the accuracy and precision output. Appropriate chemical desiccants put in the sensor systems may prevent the effect of humidity and support the validity of the proposed chemical model.

ACKNOWLEDGEMENT

The author would like to thank to Zonguldak Bulent Ecevit University Scientific Research Projects Coordination Office for financial support (Project No. BAP-2016-73338635-02).


REFERENCES


- [1] P. Wei, Z. Ning, S. Ye, L. Sun, F. Yang, K.C. Wong, D. Westerdahl and P.K.K. Louie, "Impact analysis of temperature and humidity conditions on electrochemical sensor response in ambient air quality monitoring," *Sensors*, vol. 18, no 2, pp. 59, Feb. 2018.
- [2] W. Yi, K. Lo, T. Mak, K. Leung, Y. Leung and M.A. Meng, "Survey of wireless sensor network based air pollution monitoring systems," *Sensors*, vol. 15, no 12, pp. 31392-31427, Dec. 2015.
- [3] W. Jiao, G. Hagler, R. Williams, R. Sharpe, R. Brown, D. Garver, R. Judge, M. Caudill, J. Rickard, M. Davis, L. Weinstock, S. Zimmer-Dauphinee and K. Buckley, "Community air sensor network (CAIRSENSE) project: evaluation of low-cost sensor performance in a suburban environment in the southeastern United States," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 9, no 11, pp. 5281-5292, Nov. 2016.
- [4] L. Spinelle, M. Gerboles, M.G. Villani, M. Aleixandre and F. Bonavitacola, "Field calibration of a cluster of low-cost commercially available sensors for air quality monitoring. Part B: NO, CO and CO₂," *Sens. Actuators, B*, vol. 238, pp. 706-715, Jan. 2017.
- [5] M. Aleixandre and M. Gerboles, "Review of small commercial sensors for indicative monitoring of ambient gas," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 30, pp. 169-174, Sep. 2012.
- [6] G. Whitenett, G. Stewart, K. Atherton, B. Culshaw and W. Johnstone, "Optical fibre instrumentation for environmental monitoring applications," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, vol. 5, no 5, pp. S140-S145, Sep. 2003.

- [7] G.F. Fine, L.M. Cavanagh, A. Afonja and R. Binions, "Metal oxide semi-conductor gas sensors in environmental monitoring," *Sensors*, vol. 10, no 6, pp. 5469-5502, Jun. 2010.
- [8] M.I. Mead, O.A.M. Popoola, G.B. Stewart, P. Landshoff, M. Calleja, M. Hayes, J.J. Baldovi, M.W. McLeod, T.F. Hodgson, J. Dicks, A. Lewis, J. Cohen, R. Baron, J.R. Saffell and R.L. Jones, "The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks," *Atmos. Environ.*, vol. 70, pp. 186-203, May 2013.
- [9] C. Lin, J. Gillespie, M.D. Schuder, W. Duberstein, I.J. Beverland and M.R. Heal, "Evaluation and calibration of Aeroqual series 500 portable gas sensors for accurate measurement of ambient ozone and nitrogen dioxide," *Atmos. Environ.*, vol. 100, pp. 111-116, Jan. 2015.
- [10] L. Spinelle, M. Gerboles, M.G. Villani, M. Aleixandre and F. Bonavitacola, "Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. Part A: Ozone and nitrogen dioxide," *Sens. Actuators, B*, vol. 215, pp. 249-257, Aug. 2015.
- [11] J. A. Streeton, "A Health Data on Review of Existing Six Pollutants" NEPC Service Corporation, Adelaide, SA, Australia, ISBN 0 642 323 29 1, (2000).
- [12] H. Dubost and L. Abouaf-Marguin, "Infrared spectra of carbon monoxide trapped in solid argon. Double-doping experiments with H₂O, NH₃ and N₂," *Chem. Phys. Lett.*, vol. 17, no 2, pp. 269-273, Nov. 1972.
- [13] D. Yaron, K.I. Peterson, D. Zolanz, W. Klemperer, F.J. Lovas and R.D. Suenram, "Water hydrogen bonding: the structure of the water-carbon monoxide complex," *J. Chem. Phys.*, vol. 92, no 12, pp. 7095-7109, Jun. 1990.
- [14] J. Sadlej and V. Buch, "*Ab initio* study of the intermolecular potential of the water-carbon monoxide complex," *J. Chem. Phys.*, vol. 100, no. 6, pp. 4272-4283, Mar. 1994.
- [15] J. Lundell and Z. Latajka, "Density functional study of hydrogen-bonded systems: the water-carbon monoxide complex," *J. Phys. Chem. A*, vol. 101, no 27, pp. 5004-5009, Jul. 1997.
- [16] J.J.P. Stewart, "Optimization of parameters for semiempirical methods. I Method," *J. Comput. Chem.*, vol. 10, no 2, pp. 209-220, Mar. 1989.
- [17] D. C. Young, *Computational Chemistry*, New York: Wiley, 2001.
- [18] A. Ebrahimi, P. Karimi, F.B. Akher, R. Behazin and N. Mostafavi, "Investigation of the π - π stacking interactions without direct electrostatic effects of substituents: the aromatic||aromatic and aromatic||anti-aromatic complexes," *Mol. Phys.*, vol. 112, no 7, pp. 1047-1056, 2014 (Published online: Sep. 2013).
- [19] S.K. Mudedla, K. Balamurugan and V. Subramanian, "Computational study on the interaction of modified nucleobases with graphene and doped graphenes," *J. Phys. Chem. C*, vol. 118, no 29, pp. 16165-16174, Jul. 2014.
- [20] S.F. Boys and F. Bernardi, "The calculation of small molecular interactions by the differences of separate total energies. Some procedures with reduced errors," *Mol. Phys.*, vol. 19, no 4, pp. 553-566, 1970 (Published online: Aug. 2006).
- [21] J.D. Mottishaw and H. Sun, "Effects of aromatic trifluoromethylation, fluorination, and methylation on intermolecular π - π interactions," *J. Phys. Chem. A*, vol. 117, no 33, pp. 7970-7979, Aug. 2013.
- [22] M. J. Frisch, G. W. Trucks, H. B. Schlegel, G. E. Scuseria, M. A. Robb, J. R. Cheeseman, G. Scalmani, V. Barone, B. Mennucci, G. A. Petersson, H. Nakatsuji, M. Caricato, X. Li, H. P. Hratchian, A. F. Izmaylov, J. Bloino, G. Zheng, J. L. Sonnenberg, M. Hada, M. Ehara, K. Toyota, R. Fukuda, J. Hasegawa, M. Ishida, T. Nakajima, Y. Honda, O. Kitao, H. Nakai, T. Vreven, J. A. Montgomery Jr., J. E. Peralta, F. Ogliaro, M. Bearpark, J. J. Heyd, E. Brothers, K. N. Kudin, V. N. Staroverov, R. Kobayashi, J. Normand, K. Raghavachari, A. Rendell, J. C. Burant, S. S. Iyengar, J. Tomasi, M. Cossi, N. Rega, J. M. Millam, M. Klene, J. E. Knox, J. B. Cross, V. Bakken, C. Adamo, J. Jaramillo, R. Gomperts, R. E. Stratmann, O. Yazyev, A. J. Austin, R. Cammi, C. Pomelli, J. W. Ochterski, R. L. Martin, K. Morokuma, V. G. Zakrzewski, G. A. Voth, P. Salvador, J. J. Dannenberg, S. Dapprich, A. D. Daniels, O. Farkas, J. B. Foresman, J. V. Ortiz, J. Cioslowski, and D. J. Fox, *Gaussian 09*, Revision E.01. (2009). Gaussian Inc., Wallingford CT, USA.
- [23] R. G. Pearson, *Chemical Hardness: Applications from Molecules to Solids*, Weinheim: Wiley, 1997.
- [24] P.P. Singh, H.K. Srivastava and F.A. Pasha, "DFT-based QSAR study of testosterone and its derivatives," *Bioorg. Med. Chem.*, vol. 12, no 1, pp. 171-177, Jan. 2004.
- [25] H.K. Srivastava, F.A. Pasha, S.K. Mishra and P.P. Singh, "Novel applications of atomic softness and QSAR study of testosterone derivatives," *Med. Chem. Res.*, vol. 18, no 6, pp. 455-466, Jul. 2009.
- [26] R.G. Parr, L.v. Szentpály and S. Liu, "Electrophilicity index," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 121, no 9, pp. 1922-1924, Mar. 1999.
- [27] E.V. Rokhina and R.P.S. Suri, "Application of density functional theory (DFT) to study the properties and degradation of natural estrogen hormones with chemical oxidizers," *Sci. Total Environ.*, vol. 417-418, pp. 280-290, Feb. 2012.
- [28] T. Koopmans, "Über die Zuordnung von Wellenfunktionen und Eigenwerten zu den Einzelnen Elektronen Eines Atoms," *Physica*, vol. 1, no 1-6, pp. 104-113, 1934.
- [29] I. Fleming, *Frontier Orbitals and Organic Chemical Reactions*, London: Wiley, 1976.
- [30] J. E. Huheey, *Inorganic Chemistry: Principles of Structure and Reactivity*, New York: Harper & Row Pub., 1978.
- [31] A. Raya, C. Barrientos-Salcedo, C. Rubio-Póo and C. Soriano-Correa, "Electronic structure evaluation through quantum chemical descriptors of 17 β -aminoestrogens with an anticoagulant effect," *Eur. J. Med. Chem.*, vol. 46, no 6, pp. 2463-2468, Jun. 2011.

TIG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmiş Alüminyum 1050 Alaşımının Mekanik Ve Mikroyapı Özellikleri

*¹ Arife Kübra Demirbaş, ² Sinem Çevik

¹ Ondokuzmayıs Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 55210, Samsun, Türkiye,
akubrademirbas@gmail.com, 

² Ondokuzmayıs Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 55210, Samsun, Türkiye,
scevik76@gmail.com, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 08.11.2019

Kabul Tarihi: 07.07.2020

Öz

Alüminyum ve alüminyum alaşımları iyileştirilmiş mukavemet özellikleri, hafif olmaları, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, yüksek korozyon dirençleri nedeniyle gıda, kimya, otomotiv ve gemi inşa endüstrileri, taşıt, makina ve cihaz yapımı ile mimari alanda, inşaat, havacılık ve uzay endüstrilerinde çok geniş kullanım alanına sahiptirler ve bu alanların çoğunda alüminyumun kaynağı uygulanmaktadır. TIG (Tungsten Inert Gas) kaynağı, ekonomik oluşu ve kolay uygulanabilir olması nedeniyle alüminyum ve alaşımlarının birleştirilmesinde tercih edilmektedir. Bu çalışmada Al 1050 alaşımı plakalar TIG kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynakla birleştirilmiş numunelere çekme testi uygulanmıştır ve çekme dayanımları ölçülmüştür. Kaynak bölgesi ve ısı tesiri altındaki bölgelerin (ITAB) sertlik değerleri Vickers Sertlik testi uygulanarak incelenmiştir. Numunelerin kaynak uygulamasından sonraki ana metal, ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak bölgesi mikroyapıları optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda Al 1050 alaşımının TIG kaynak işlemi sonrası mekanik özellikleri ve mikroyapısı tünçelenmiştir ve yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Al 1050 alaşımı, tungsten inert gaz, kaynak, mekanik özellikler, mikroyapı

Mechanical and Microstructure Properties of Aluminum 1050 Alloy Joined with TIG Welding Method

*¹ Arife Kübra Demirbaş, ² Sinem Çevik

¹ Ondokuzmayıs University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 55210, Samsun, Turkey,
akubrademirbas@gmail.com

² Ondokuzmayıs University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 55210, Samsun, Turkey,
scevik76@gmail.com

Abstract

Aluminum and aluminum alloys due to their improved strength properties, light weight, good thermal and electrical conductivity, high corrosion resistance, are widely used in food, chemical, automotive and shipbuilding industries, vehicle, machinery and equipment, architectural, construction, aerospace industries and in most of these areas the welding of aluminum is applied. TIG (Tungsten Inert Gas) welding is preferred for joining aluminum and its alloys due to its economical and easy application. In this study, Al 1050 alloy plates are joined using TIG welding method. Tensile tests were applied to welded samples and tensile strengths were measured. The hardness values of the weld zone and heat affected zones were examined by applying Vickers Hardness Test. The main metal, heat affected zone and welding zone microstructures were examined by using optical microscope. According to the results, mechanical properties and microstructure of Al 1050 alloy after TIG welding were investigated and interpreted.

Keywords: Al 1050 alloy, tungsten inert gas, welding, mechanical properties, microstructure

*Corresponding Author: Ondokuzmayıs University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 55210, Samsun, Turkey, akubrademirbas@gmail.com

1. GİRİŞ

Alüminyum ve alüminyum alaşımları iyileştirilmiş mukavemet özellikleri, hafif olmaları, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, yüksek korozyon dirençleri nedeniyle gıda, kimya, otomotiv ve gemi inşa endüstrileri, taşıt, makina ve cihaz yapımı ile mimari alanda, inşaat, havacılık ve uzay endüstrilerinde çok geniş kullanım alanına sahiptirler ve bu alanların çoğunda alüminyumun kaynağı uygulanmaktadır [1-4]. Saf alüminyum iyi ısı iletkenliğine sahiptir ve oldukça yumuşak bir malzemedir. Alüminyumun özelliklerini değiştirmek için az miktarda alaşım elementi ilavesi yapmak yeterli olmaktadır. Teknolojik işlemlerden geçirilebilir ve araç-gereçler, yapısal elemanlar ve diğer ürünler için kullanılabilirler [5,6]. Alüminyum ve alaşımları, çeşitli kaynak yöntemlerini kullanırken dikkat edilmesi gereken bazı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Alüminyum alaşımlarının kaynak uygulamasındaki en ciddi problemlerden biri, kaynak havuzunda meydana gelen türbülans sırasında koruyucu gazlar, hava ve hidrojen gibi gazların sıkışmasından oluşan gözenekliliktir. Soğutma hızı çok yüksek olduğunda, bu gazlar kaynak havuzundan çıkamaz ve bu da kaynak bölgesinde gözenek oluşmasına neden olur. Aslında, tüm kaynaklanmış alüminyumlarda az miktarda gözeneklilik bulunmaktadır. Bunun nedeni, hidrojenin sıvı ve katı alüminyumdaki büyük çözünürlük farkı olmaktadır [7-10]. Bu olumsuz özelliğinin yanı sıra alüminyum ve alaşımlarının yüzeyi çok yüksek sıcaklıkta bir oksit tabakası ile kaplanmaktadır. Bu oksit tabakası çok sıkı bir şekilde yüzeyi sararak oksitlenmenin iç kısımlara doğru ilerlemesini önlemektedir. Bu oksit kaynak sıcaklığında ergimeydiğinden kaynak dikişine doğru elektrotun ergimesi ile geçer ve kaynak bağlantısının sürekliliğini sağlayan damlacıkların bir araya gelmesine engel olur [11].

Alüminyum ve alaşımlarının sahip olduğu olumsuz kaynak uygulaması özelliklerinden dolayı kaynak işlemi ile birleştirilmelerinde meydana gelen hataların en aza indirilmesi için yapılacak olan çalışmalar oldukça önemlidir. Her alüminyum alaşımı sahip olduğu farklı kimyasal özelliklerinden dolayı kaynak işlemini sonrası meydana gelen yapısı da farklı olmaktadır. Geleneksel kaynak yöntemleri ya da her kaynak yöntemi alüminyum alaşımlarının hepsi için uygun olmayabilmektedir. Al 1050 alaşımı kolay şekillendirilebilen, yüksek korozyon direncine sahip ve mimari ve dekoratif uygulamalarda, kaplama levhalarında ve inşaat sektöründe oldukça yaygın kullanımı olan bir malzemedir [12]. Kullanım alanı çok yaygın olan bu alüminyum alaşımının kaynak uygulamaları ve kaynak sonrası kimyasal ve fiziksel özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Al 1050 alaşımının literatürde az sayıda TIG kaynak yöntemi kullanılarak yapılan deneysel çalışmaları bulunmaktadır. Alüminyum ve alaşımlarının birleştirilmesinde TIG kaynak yöntemi ekonomik olması, kolay uygulanabilirliği, kaliteli kaynak bölgesi elde edilmesi nedeniyle genellikle tercih edilmektedir [13-18]. Tungsten inert gaz (TIG) kaynağı, koruyucu gaz ortamında, tüketilemeyen bir tungsten elektrotu ile ana metal malzeme arasında oluşan bir ark ile metallerin ısınarak birleşmesini

sağlayan bir ark kaynağı işlemidir. TIG kaynak yöntemi; ısı girdisi yerel olduğu için ısı iletim katsayısı yüksek olan alüminyum ve alaşımlarının kaynağında oluşan çarpılmaları en aza indirdiğinden çok tercih edilen bir gazaltı kaynak yöntemidir. TIG kaynağında, iki çeşit akım; doğru ya da alternatif akım kullanılabilir. Ancak alüminyum alaşımlarının kaynağında alternatif akım kullanılması gerekmektedir [19-21]. Normalde, negatif kutup (DCEN) olarak tungsten ile bir DC arkı kullanılmaktadır. Eğer iş parçası anot olarak kullanılırsa, oksit tabakasının bulunduğu alüminyum ve magnezyum gibi metaller için bu arkın kullanımı mümkün değildir. Bu katman kaynak havuzunun oluşumunu önlemektedir. Hareketli olan katod noktası oksit tabakasını dağıtabilir, ancak eğer anot olarak kullanılırsa tungsten elektrotunda aşırı ısı üretimi olmaktadır [22].

Yapılan bu çalışmada Alüminyum 1050 alaşımı TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Birleştirilen numunelerin çekme dayanımları, kaynak bölgesi Vickers sertlik değerleri incelenmiştir. Optik mikroskopta birleşme bölgelerinin mikroyapıları incelenerek kaynak işleminin alaşımın mekanik özelliklerine olan etkisi mikroyapı ile ilişkilendirilerek yorumlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada 4 mm kalınlıkta ve 65x100 mm boyutlarındaki Al 1050 alaşım levhaları TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kullanılan alaşımın ağırlıkça kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Kaynak işlemi öncesi alüminyum alaşımların yüzeyinde bulunan ve kaynak sıcaklığında ergimeyen oksit tabakası paslanmaz çelik fırça ile temizlenerek birleştirme sırasında bu tabakanın kaynak dikişine geçişi en aza indirilmiştir. Birleştirme için kullanılan kaynak parametreleri Tablo 2'de verilmiştir ve kaynak işlemi sonrası levha Şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Alüminyum 1050 alaşımının ağırlıkça kimyasal bileşimi (%).

Fe	Si	Zn	Ti	Mg	Mn	Cu	Al
0,4	0,25	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	99,5

Tablo 2. Kaynak parametreleri.

Kaynak Akımı	Kaynak Gerilimi	Ark Tipi	Koruyucu Gaz	Dolgu Teli
80 A	7-8 V	Darbeli	Argon	Cr4043



Şekil 1. TIG kaynak yöntemiyle birleştirilmiş levhaların görüntüsü.

Kaynakla birleştirilen levhalara çekme testi ve Vickers sertlik testi uygulanmıştır. Kaynak bölgesi, ısı tesiri altındaki bölge ve ana metal bölgesi mikroyapıları optik mikroskop altında incelenmiştir.

2.1. Çekme Testi

Çekme testleri 10-tone universal MARES çekme-basma test cihazından gerçekleştirilmiştir. 4x20x130 mm boyutlarındaki 4 adet numuneye çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi uygulanan numuneler Şekil 2’de gösterilmiştir. Kaynak ile birleştirilen alaşımların çekme mukavemetleri incelenerek yorumlanmıştır.



Şekil 2. Çekme testi için hazırlanan numuneler.

2.2. Sertlik Testi

Numunelerin sertlik değerleri TMTECK HV-1000B Mikro sertlik cihazı kullanılarak 15 sn süre ile 0.98 kg kuvvet uygulanarak 3 mm aralıklar ile ölçülmüştür. Kaynak bölgesi, ısı tesiri altındaki bölge ve ana metal bölgesi sertlik değerleri karşılaştırılarak kaynak işleminin alaşımın sertliğine olan etkisi incelenmiştir.

2.3. Mikroyapı İncelemesi

Kaynak işlemi sonra numunelerin kaynak bölgesi ve ITAB mikroyapıları Leica DM2500 P optik mikroskopu kullanılarak görüntülenmiştir. TIG kaynağının alaşımın mikroyapısına etkisi ve buna bağlı olarak numunelerin mekanik özelliklerindeki değişim yorumlanmıştır. Numuneler optik mikroskop incelemesinden önce Keller ayracı (2ml HF + 3ml HCl + 5ml HNO₃ + 190ml Su) kullanılarak 1 dk süre ile dağlanmış. Dağlama işlemi sonrası numunelerin ana metal bölgesi, kaynak bölgesi ve ITAB mikroyapısı görüntülenmiştir.

3. BULGULAR

3.1.Çekme Testi Sonuçları

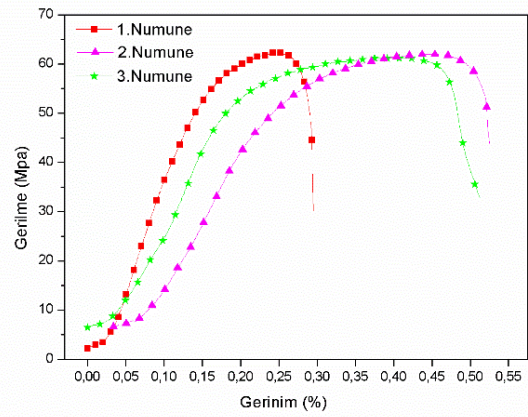
Çekme testi uygulanan 3 numune birleşme bölgesinden(kaynak bölgesi) değil ısıdan etkilenen bölgeden

kopmuştur. Çekme testi sonrası numune Şekil 3’te gösterilmiştir.

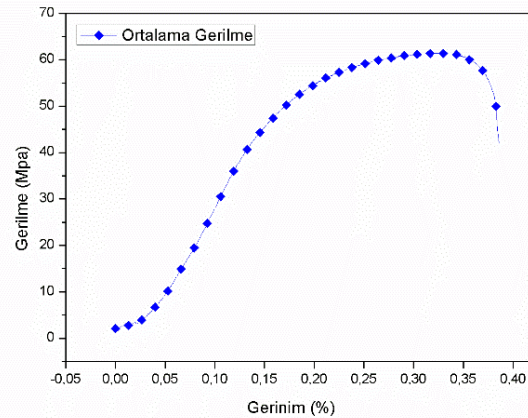


Şekil 3. Çekme testi sonrası numune.

Numunelerin gerilme değerleri Şekil 4’deki grafikte gösterilmiştir. Tüm numunelerin birbirlerine yakın değerlerde çekme gerilmesine sahip olduğu görülmüştür. 3 numunenin ortalama gerilme değeri Şekil 5’deki grafikte verilmiştir.

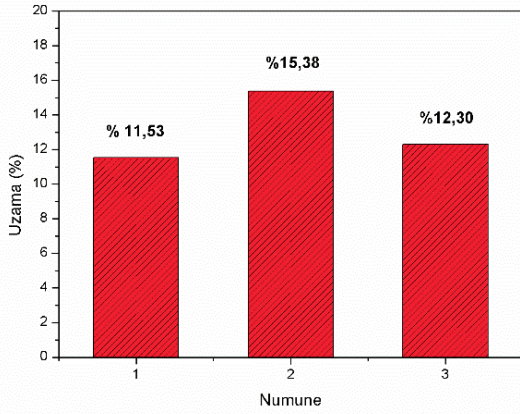


Şekil 4. Çekme testi uygulanan numunelerin gerilme-gerinim grafiği.



Şekil 5. Numunelerin ortalama gerilme-gerinim grafiği.

Numuneler sünek bir alaşım malzemesi olduğundan çekme işlemi sonrası numune boylarında uzaman meydana gelmiştir. Tüm numunelerin uzama(%) değerleri Şekil 6’daki grafikte gösterilmiştir.



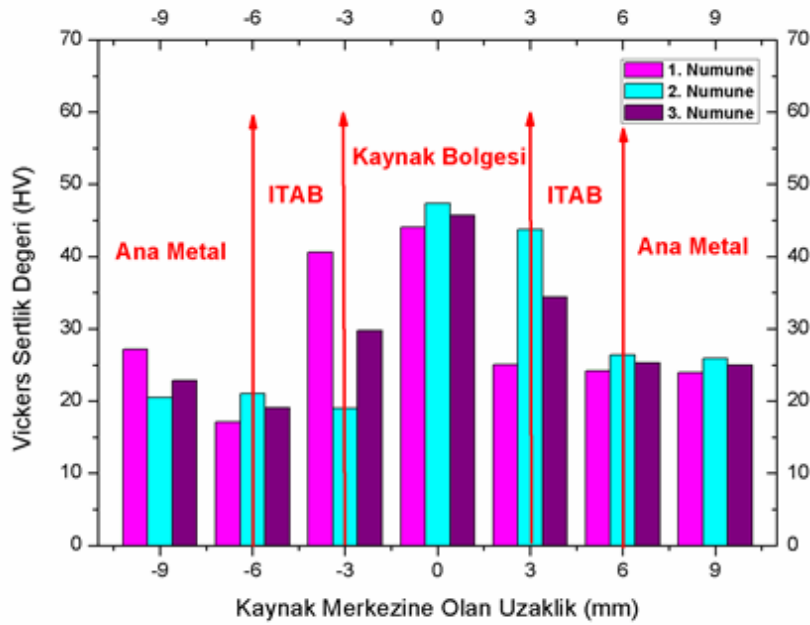
Şekil 6. Çekme testi sonrası numunelerin %uzama değerleri.

3.2. Vickers Sertlik Sonuçları

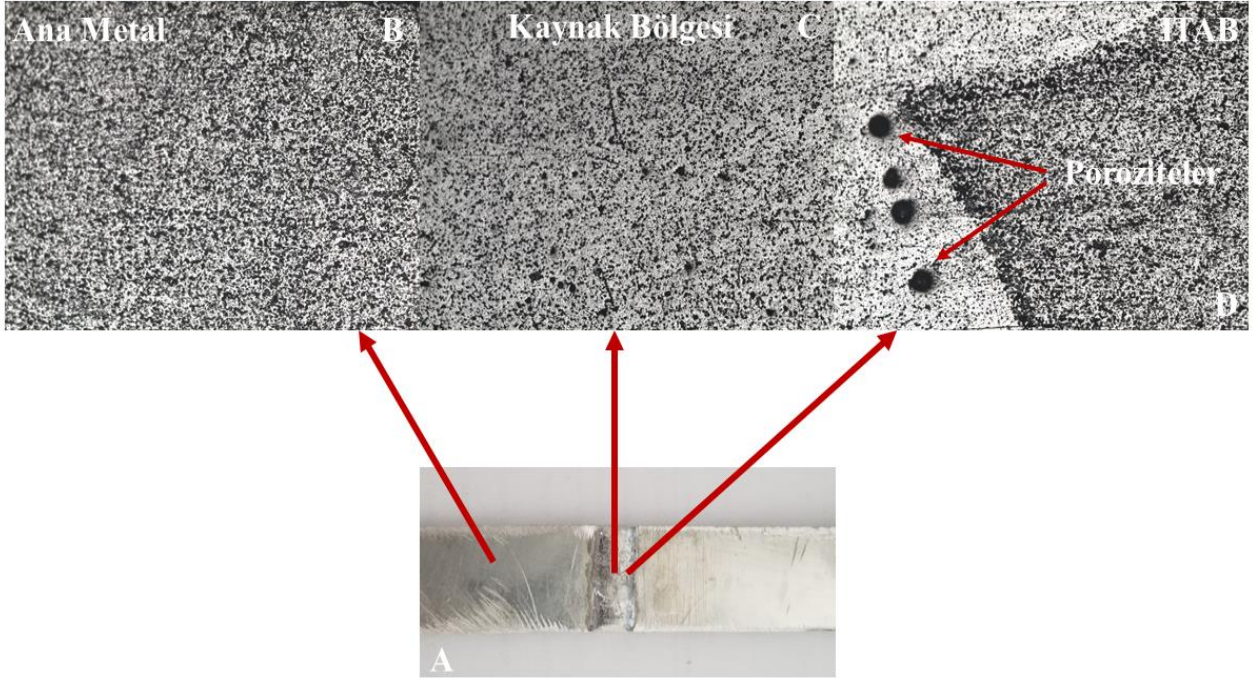
Kaynak bölgesi merkez noktası olacak şekilde 3 mm aralıklarla toplamda 7 noktaya vuruş yapılmıştır. Sırasıyla ana metal bölgesi, ITAB, kaynak bölgesi, ITAB ve ana metal bölgesi sertlik değerleri ölçülmüştür. 3 bölgenin sertlik değerleri tüm numuneler için Şekil 7’de gösterilmiştir.

3.3. Mikroyapı Görüntüleri

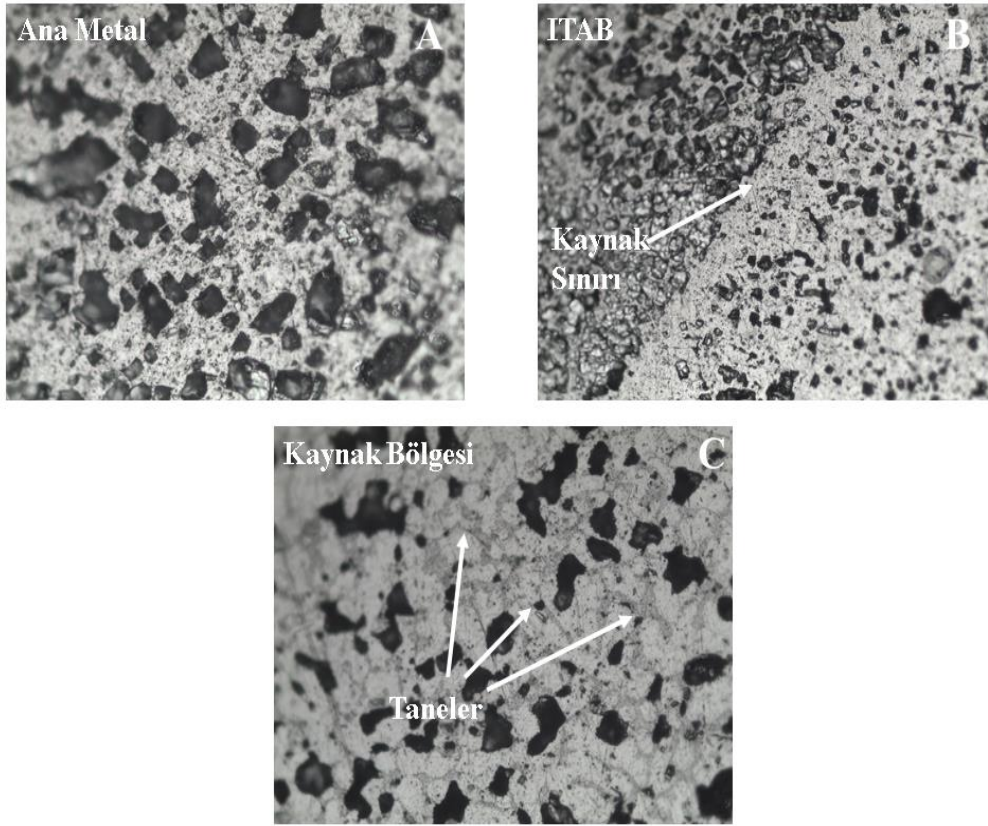
Şekil 8’de TIG kaynaklı numunenin 5x büyütmedeki mikroyapıları gösterilmiştir. Kaynakla birleştirilen numunenin ana metal bölgesi, kaynak bölgesi ve ITAB Şekil 8(A)’da belirtilerek bu bölgelerin mikroyapıları verilmiştir. %50 büyütme alınan mikroyapı görüntüleri Şekil 9’da gösterilmiştir. Bu görüntülerde tane sınırları ve poroziteler açıkça görülmektedir.



Şekil 7. Numunelerin ana metal, ITAB ve kaynak bölgesi sertlik değerleri.



Şekil 8. TIG kaynağı ile birleştirilen numune(A), 5x büyütmedeki ana metal bölgesi(B), kaynak bölgesi(C) ve ITAB(D).



Şekil 9. 50x büyütmedeki kaynaklı numunelerin mikroyapı görüntüleri, ana metal(A), ITAB(B), kaynak bölgesi(C).

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Bu çalışmada TIG kaynak yöntemi ile birleştirilen Al 1050 alaşım levhaların mekanik ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Birleştirilen numunelere çekme ve sertlik testleri uygulanmıştır. Kaynak bölgesi ve çevresinin mikroyapıları optik mikroskop ile incelenmiştir.

Alüminyum sünek ve yumuşak bir metal olduğundan çekme testi sonrasında numuneler sünek kırılma davranışı göstermiştir. Kaynak bölgesi metali ana metal ve ısıdan etkilenen bölgeden daha sağlam ve sert olduğundan çekme sonrası numuneler kaynak metalinden değil ITAB'dan kopmuştur. Şekil 4'deki grafikten görüldüğü üzere en yüksek gerilme dayanımı 62,23 N/mm² olarak belirlenmiştir. Ortalama gerilme dayanımı ise 61,13 N/mm² olarak hesaplanmıştır ve Şekil 5'deki grafikte gösterilmiştir. Kumar K. vd [8], yaptıkları çalışmada Al1050 alaşımını TIG yöntemi ile kaynaklamış ve çekme testi sonuçlarını 22.03 ile 55.828 MPa arasında elde etmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen çekme testi sonuçları daha yüksek olmuştur ve bu da yapılan kaynak işleminin daha düzgün olduğunu göstermektedir. Al 1050 alaşımının standart çekme dayanımı 65-80 Mpa'dır. Isıdan etkilenen bölgedeki düşük ısı girdisi ile birlikte gelişen yavaş soğumanın meydana getirdiği ve kaynak bölgesine oranla daha iri taneli olan mikroyapıdan dolayı bu bölgedeki mukavemette düşüş meydana gelmiştir. Kaynak bölgesine göre daha düşük mukavemetli olan ITAB'da çekme testi sırasında kopma meydana gelmiştir ve bu da numunelerin çekme dayanımlarında düşüşe neden olmuştur. Al 1050 alaşımı %38'lik uzama oranlarına çıkabilen sünek bir metaldir. Fakat kaynak işlemi uygulanan alaşımda meydana gelen tane küçülmesiyle birlikte dayanımda bir artış meydana gelmektedir. Şekil 6'dan da görüldüğü üzere kaynaklı numunelerin uzama oranı en fazla %15,38 olmuştur. El-Sayed M.A [9] yaptığı çalışmada Al1050 alaşımına sürtünme kaynağı uygulamış ve test sonuçlarına göre ortalama %9,5 elde etmiştir. Buna bakılarak %15,38'lik uzama değeri bize yapılan kaynak işleminin uzama oranını az miktarda etkilediğini ve alüminyum alaşımının sahip olduğu esnekliği koruyabildiğini göstermiştir. Isı tesiri altındaki bölgenin ana metale göre daha sert olması numunelerin uzama oranlarını düşürmüştür.

Kaynaklı numunelere uygulanan Vickers sertlik sonuçları incelendiğinde kaynak merkezlerinin en yüksek sertlik değerlerine sahip oldukları görülmüştür. Vickers sertlik değeri 25-30 HV arasında değişen Al 1050 alaşımının kaynak bölgesi sertlik değerleri 44-47 HV arasında bulunmuştur. Şekil 7'ye bakıldığında ana metal bölgesinden kaynak merkezine doğru ilerledikçe sertlik değerlerinde bir artış gözlenmektedir. Alves E.P vd [23] de yaptıkları çalışmada birleşme bölgesinin sertlik değerlerinin ana metale oranla daha yüksek olduğunu göstermiştir. En düşük sertlik değerine sahip bölge en yumuşak yapıda olan ana metal bölgesidir. Kaynak bölgesindeki sertlik artışının sebebi olarak yüksek ısı girdisiyle birlikte hızlı oluşan hızlı katılaşma sonucu alfa alüminyum tanelerinin daha küçük ve ince yapıda meydana gelmesi gösterilebilir.

Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde kaynak bölgesinde ve ITAB'da porozitelerin bulunduğu görülmüştür. Şekil 8(D)'de gösterilen, koruyucu gazların kaynak işlemi sırasında metal içerisinde sıkışmasıyla oluşan bu poroziteler metalin mukavemetinde ve sertliğinde azalmalara yol açabilmektedir. Kaynak sonrası meydana gelen mikroyapılar incelendiğinde kaynak bölgesinin ana metale göre daha ince taneli bir yapıya sahip olduğu Şekil 9(B)'de görülmüştür. Kumar K. vd [8], yaptıkları çalışmada ana metal ve kaynak bölgesinin mikroyapı değişimlerini göstermiştir ve kaynak bölgesinde oluşan ince taneli yapının kaynak esnasında meydana gelen sıcaklık değişimlerinden oluştuğunu açıklamıştır. Oluşan tane ve tane sınırları Şekil 9(C)'de açıkça görülmektedir. Kaynak bölgesinde oluşan ince taneli yapı kaynak metalinin çekme mukavemetinin ve sertliğinin artmasını sağlamıştır.

Yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır;

- 1) TIG kaynak yöntemi ile birleştirilen Al 1050 alaşımının kaynak bölgesi dikişinin oldukça temiz olduğu porozitelerin en az seviyede olmasından anlaşılabilmektedir.
- 2) Kaynak bölgesinde oluşan porozite ve oksitlenme miktarının oldukça az olduğu görülmüştür.
- 3) Birleştirme işlemi sonrasında alaşımın kaynak bölgesinin çekme mukavemeti ve vickers sertliğinde artış meydana geldiği belirlenmiştir.
- 4) Numunelerin mikroyapıları incelendiğinde kaynak bölgesinden tanelerin küçüldüğü ve daha dentritik bir yapıya dönüştükleri görülmüştür.
- 5) Al 1050 alaşımının TIG yöntemi ile kaynak uygulaması sonucunda numunelerin birleşme bölgelerinde çekme mukavemeti artmıştır, numunelerin uzama değerleri Al 1050 alaşımı değerleri kadar iyi çıkmıştır.

KAYNAKÇA

- [1].Baskutis S., Baskutiene J., Bendikiene R., and Ciuplys A., Effect of weld parameters on mechanical properties and tensile behavior of tungsten inert gas welded AW6082-T6 aluminium alloy, *J. Mech. Sci. Technol.* 33(2): 765-772, 2019.
- [2].Taban E., and Kaluc E., Microstructural and mechanical properties of double-sided MIG, TIG and friction stir welded 5083-H321 aluminium alloy, *Kovove Mater.* 44: 25-33, 2006.
- [3].Liu L., Ren D., and Liu F., A Review of Dissimilar Welding Techniques for Magnesium Alloys to Aluminum Alloys, *Mater.* 7: 3735-3757, 2014.
- [4].Lin S.B., Song J.L., Ma G.C., Yang C.L., Dissimilar metals TIG welding-brazing of aluminum alloy to galvanized steel, *Front. Mater. Sci. China* 3(1): 78-83, 2009.
- [5].Tušek J., Klobčar D., Tungsten inert gas (TIG) welding of aluminum alloy en AW-AlZn5.5MgCu, *Metalurgija* 55(4): 737-740, 2016.
- [6].Çetinkaya C., Tekeli S., Kurtuluş O., Alüminyum Alaşımlarının Kaynaklanabilirliği Ve Kaynak

Parametrelerin Mekanik Özelliklere Ve Mikroyapıya Etkisi, *Politeknik Dergisi* 5(4): 321-333, 2002.

[7]. Luijendijk T., Welding of dissimilar aluminium alloys, *J. Mater. Process Tech.* 103: 29-35, 2000.

[8]. Kumar K., Mohan P., Masanta M., Influence of welding current on the mechanical property of 3 mm thick commercial 1050 aluminium butt joint weld by AC-TIG welding method, *Mater. Today: Proc.* 5: 24141–24146, 2018.

[9]. El-Sayed M.A., Effect of Welding Conditions on the Mechanical Properties of Friction Stir Welded 1050 Aluminum Alloy, *Internat. Rev. of Mech. Engin.* 9(3): 252-256, 2015.

[10]. Schubert E., Challenges in Thermal Welding of Aluminium Alloys, *World J. of Engin. and Tech.* 6: 296-303, 2018.

[11]. Kara R., Yıldırım G., Çolak F., ve Tınas M., TIG ve Elektrik Ark Kaynağı ile Birleştirilen Alüminyum Plakaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *El-Cezeri J. of Sci. and Engin.* 4(2): 274-281, 2017.

[12]. Empo aluminium, EN AW 1050 ürün özellikleri, URL; <http://www.empo.com.tr/aluminyum-levha/en-aw-1050.html> (Erişim Zamanı; Haziran 6, 2020).

[13]. Durgutlu A., Alüminyumun TIG Kaynağında Akım Türünün Kaynak Metali Mikroyapısı ve Darbe Dayanımına Etkisi, *Gazi Üni. Müh. ve Mimar. Fak. Derg.* 24(1): 155-160, 2009.

[14]. Patil P.C., Shelke R.D., Review On Welding Parameter Effects On TIG Welding of Aluminium Alloy, *Internat. J. of Engin. Res. and Gen. Sci.* 3(3): 1479-1486, 2015.

[15]. Kumar Singh S., Tiwari R.M., Kumar A., Kumar S., Murtaza Q., and Kumar S., Mechanical Properties and

Micrstructure of Al-5083 by TIG, *Mater. Today: Proc.* 5: 819–822, 2018.

[16]. Manti R., Dwivedi D.K., and Agarwal A., Pulse TIG Welding of Two Al-Mg-Si Alloys, *J. of Mater. Engin. and Perfor.* 17:667–673, 2008.

[17]. Kumar A., and Sundarajan S., Optimization of pulsed TIG welding process parameters on mechanical properties of AA 5456 Aluminum alloy weldments, *Mater. and Design* 30: 1288–1297, 2009.

[18]. Durgutlu A., Kahraman N., Gülenç B., Al - Si Alaşımının TIG Kaynağında Darbeli Akımın Mikroyapı, Sertlik, Eğme ve Çekme Dayanımına Etkisi, *Politeknik Dergisi* 11(4): 339-344, 2008.

[19]. Tarng Y.S., Tsai H.L., Yeh S.S., Modeling, Optimization And Classification of Weld Quality in Tungsten Inert Gas Welding, *Internat. J. of Mach. Tools & Manuf.* 39: 1427–1438, 1999.

[20]. Ayvaz M., ve Çetinel H., Farklı Alüminyum Alaşımlarının, TIG Kaynak Yöntemi ile Kaynatılması ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Celal Bayar Üniv. Fen Bilim. Derg.* 7(1): 39-46, 2011.


[21]. Durgutlu A., Alüminyumun TIG Kaynağında Argon-Hidrojen Gaz Karışımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi, *Politeknik Dergisi* 10(3) : 271-276, 2007.

[22]. Khotiyan S.K., Kumar S., Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of TIG and MIG Welding Using Aluminium Alloy, *Internat. J. of Educ. and Sci. Res. Review* 1(5): 90-96, 2014.

[23]. Alves E.P., Neto F.P., Welding of AA1050 aluminum with AISI 304 stainless steel by rotary friction welding process, *J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos*, 2(3): 301-306, 2010.

Performance of Organic and Inorganic Acids in the Extraction of Vanadium from Silica Sand by Leaching Method

*¹Hasan Hacifazlioglu, ²Ilgin Kursun, ³Mert Terzi

¹Istanbul University Cerrahpasa, Department of Mining Engineering, hasanh@istanbul.edu.tr, 

²Istanbul University Cerrahpasa, Department of Mining Engineering, ilginkur@istanbul.edu.tr, 

³Istanbul University Cerrahpasa, Department of Mining Engineering, mert.terzi@istanbul.edu.tr, 

Research Paper

Arrival Date: 21.02.2019

Accepted Date: 07.07.2020

Abstract

In this study, performance of organic acids in the extraction of vanadium from silica sand, a potential vanadium source, were investigated by leaching method. Silica sand samples used in this study was obtained from a silica sand beneficiation plant operating in Istanbul, Turkey. In the context of experimental studies, detailed characterization tests and leaching tests with organic and inorganic acids were performed on the representative samples obtained from the desliming unit of the plant, and the optimum extraction conditions for vanadium were determined. The obtained results showed that the best result for vanadium extraction was obtained with hydrofluoric acid. The extraction efficiency of vanadium was found to be 76% under optimal leaching conditions of 2 h of leaching time, 800 kg/ton of HF amount and 40°C pulp temperature. On the other hand, the best results among the organic acids were obtained with oxalic acid. The extraction efficiency of vanadium was found to be 50% under optimal leaching conditions of 2 h of leaching time, 200 kg/ton of oxalic acid amount and 40°C pulp temperature.

Keywords: Vanadium, silica sand, leaching method, organic acids, inorganic acids

1. INTRODUCTION

The existence of vanadium was discovered by Spanish mineralogist Manuel Del Rio in 1801 in Mexico as a result of the studies performed on lead vanadate ore [1-2]. Vanadium is a relatively abundant trace element found in the Earth's crust and it occurs within many minerals and ore deposits. While it does not found in its native metal form in

the nature; it co-exists with other elements in many different mineral species. Vanadium minerals are classified into seven groups which are namely oxides, phosphates, silicates, sulphates, sulphurs, titanates and vanadates [3]. Most common vanadium bearing minerals are carnotite, motttramite, patronite, roscoelite and vanadinite [2, 4]. Production data for 2015-2018 and the current reserves of vanadium were presented in Table 1.

Table 1. Worldwide production of vanadium and vanadium reserves [5]

	Production					Reserves (x1000 mton)
	2013	2014	2015	2016	2017	
U.S.A.	591				-	45
Australia	400				-	2,100
Brazil	-	1,030	5,800	8,000	8,400	-
China	41,000	45,000	42,000	45,000	43,000	5,100
Russia	15,000	15,100	16,000	16,000	16,000	5,000
S. Africa	21,000	21,000	14,000	10,000	13,000	3,500
Others	600	580	-	-	-	-
Total	79,000	82,700	77,800	79,000	80,000	14,000

Vanadium is almost only significant by-product used in ferrous and non-ferrous alloys owing to its physical properties such as high tensile strength, hardness and fracture strength. It is used in a wide range of alloy combinations with iron, titanium, nickel, aluminium, chrome and other metals for various commercial applications such as railroads, steel

tools, catalysts and aviation. Global demand for vanadium is met by several primary resources as feedstock, concentrates, metallurgic slags and petroleum wastes. Moreover, mine tailings and waste ashes have a significant economic potential as they can contain high amounts of vanadium and nickel [4, 6].

*Corresponding Author: Istanbul University Cerrahpasa, Department of Mining Engineering, hasanh@istanbul.edu.tr, Tel: 05368711337

Hydro-metallurgical and pyro-metallurgical methods are used for the recovery of vanadium. Most common methods are direct acid or alkali leaching and post-roasting acid, alkali leach or water leaching. Alkali leaching is generally preferred method for the selective recovery of vanadium from iron. However, this method may also resulting a partial dissolution of silica in addition to vanadium. Moreover, it is somewhat an expensive method due to the reagents used in the process. On the other hand, dissolution of silica in sulphuric acid is relatively limited; but selective recovery with this method is not possible in terms of simultaneous recovery of nickel and vanadium. At the same time, it is a cost-effective and efficient method [2].

Li et al., (2010) have investigated the feasibility of vanadium recovery from black shale using sulphuric acid and hydrochloric acid leaching routes. The obtained results showed that the dissolved vanadium was in the form of VO_2^+ and VO_2^+ in an aqueous solution with high potential and low pH value. Optimum parameters were determined as 87.5 g/L sulphuric acid concentration, 6-hours reaction time, 15 g/L hydrochloric acid concentration, 1 g/L sodium hypochloride concentration, 95 °C pulp temperature and 4 mL/g solid/liquid rate. Under these optimum conditions, vanadium recovery was found to be 86% [7]. Li et al., (2011) have investigated vanadium production from a low grade vanadium slag using oxidization process in the presence of Na_2CO_3 . Oxidization conditions were investigated with the techniques of XRD, SEM/ DS and TG-DSC. The obtained results showed that vanadium slag was oxidized in the temperature range of 273 °C and 700 °C and the optimum oxidizing temperature range was found to be 500-600°C as water-soluble sodium vanadates are formed at this temperature range. On the other hand the samples are sintered at 800°C, which negatively affects the leaching rate of vanadium [8]. Aarabi-Karasgani et al., (2010) also investigated the vanadium recovery from Linz–Donawitz (LD) converter slag production using alkali roasting-acid leaching route and determined the effects of different parameters on vanadium dissolution kinetics. Under optimum leaching conditions, which were 70°C pulp temperature, 3 M acid concentration and 150 minutes leaching time, approximately 95% vanadium recovery was achieved [9]. Fan et al., (2013) have investigated the feasibility of both bulk and column tests for the recovery of vanadium from the vanadium containing chromate solutions using a mild base resin named D314 [10].

Several studies have also been conducted for the recovery of vanadium from hard coal [11-12]. In this regard, Wang et al., (2013) have performed a study for vanadium recovery from the hard coal using flotation. A concentrate with 1.88% V_2O_5 grade was obtained with a recovery rate of approximately %77. Moreover, 72.51% of the feed mass was removed as tailings after this process [12].

In this study, investigation of the applicability of the leaching method using organic and inorganic acids for the extraction

of vanadium from silica sand were aimed, and silica sands were evaluated as a potential vanadium resource.

2. EXPERIMENTAL STUDIES

2.1. Material

The sample used in the experimental studies was taken from the desliming unit of a silica sand beneficiation facility operating in Sile, Istanbul. In the facility, raw silica sand was firstly subjected to scrubbing and filtering, then classified by hydrocyclones and other hydraulic classifiers and, finally transferred to the beneficiation plant. The samples used in the experimental studies were representatively taken from stockpiled silica sand which were pre-processed in the desliming unit. Several chemical, physical and mineralogical analyses were performed to characterize the sample before leaching experiments. The results of the chemical analysis carried out with XRF and ICP methods are given in Table 2.

Table 2. Results of chemical analysis of the deslimed sample

Content	Assay Value	Content	Assay Value
SiO_2 (%)	81.63	Cr_2O_3 (%)	0.07
Al_2O_3 (%)	15.66	P_2O_5 (%)	0.07
TiO_2 (%)	1.15	SO_3 (%)	0.05
Fe_2O_3 (%)	0.54	BaO (%)	0.05
K_2O (%)	0.37	Na_2O (%)	0.04
ZrO_2 (%)	0.17	V (ppm)	50.00
CaO (%)	0.12	Other (%)	0.01
MgO (%)	0.07	Total	100.00

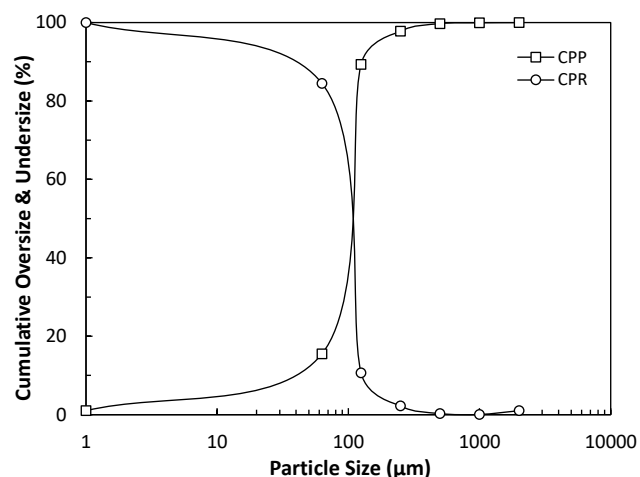


Figure 1. Particle size distribution of the sample

As seen in the particle size distribution graph of the sample (Fig. 1), the d_{50} and d_{80} sizes of the sample are 0.08 mm and 0.12 mm, respectively. Therefore, it can be said that the sample has a suitable particle size distribution for the leaching procedure without a need for further size reduction. Results of the optic and scanning electron microscope examinations showed that the sample is mainly consisting of hematite, ilmenite, magnetite and rutile minerals in addition to the dominant mineral phase, quartz (Fig.2).

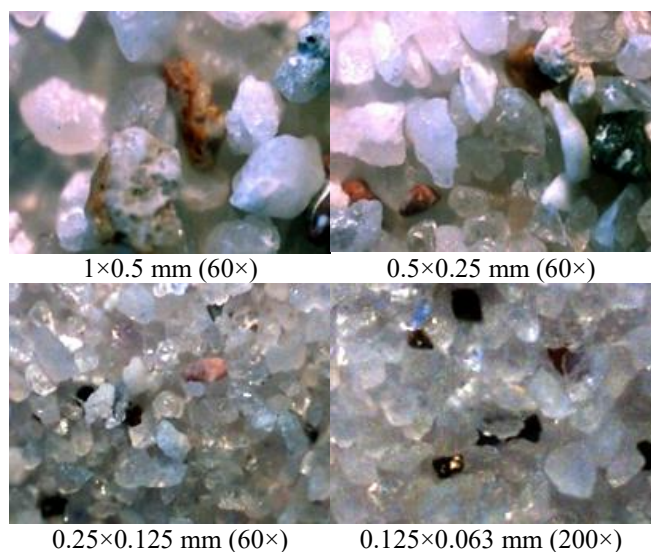


Figure 2. Optic microscope images of the particle size fractions

According to SEM images (Fig. 3), quartz particles within the sample have generally preserved their overall euhedral structures. On the other hand, due to the weathered conditions in the deposit, a considerable roundness in several quartz particles were also observed. Additionally, it was seen that the iron bearing particles, such as magnetite and hematite, in the sample have also preserved their euhedral crystal structures. Results of SEM analysis have also confirmed that the vanadium content in the sample is commonly distributed within magnetite particles.

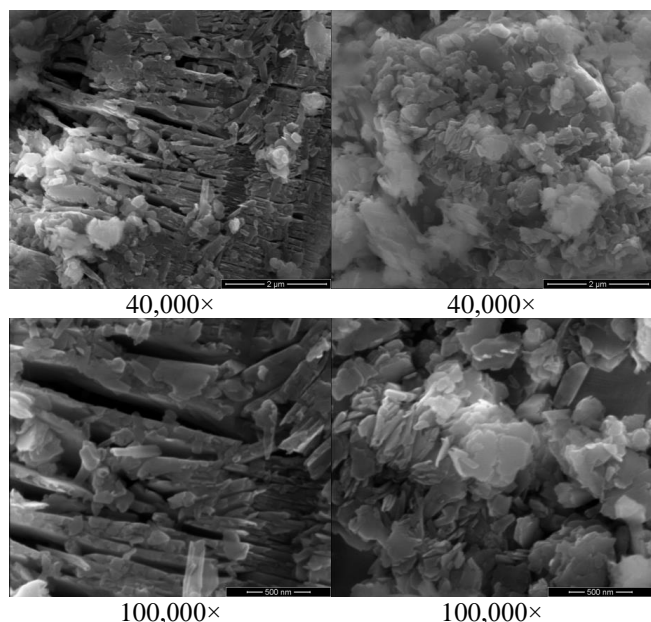


Figure 3. SEM images of the sample

2.2. Method

In the context of leaching tests, direct acid leaching method were applied using different organic and inorganic acids as

lixiviant for the selective vanadium extraction from silica sand. The organic acids used were citric, tartaric and oxalic acids whereas the inorganic acids were sulphuric (H₂SO₄), hydrochloric (HCl) and hydrofluoric (HF) acids. The silica sand samples was subjected to the leaching process for 2 hours under an average leaching temperature (40°C) at different acid amounts (100, 200, 400, 600, 800 and 1000 kg/t). The leaching tests were performed in 250 cc of conical flasks in a shaking water bath under shaking rate of 250 rpm. After the leaching procedure, solid-liquid separation was performed by filtration, then the obtained residues were dried at 105°C and finally the vanadium content was analysed using the ICP method. The vanadium extraction rate was calculated according to Equation 1.

$$V. E. (\%) = \frac{[V_{feed} - V_{residue}]}{V_{feed}} * 100 \tag{1}$$

3. FINDINGS

The results of leaching experiments performed with different organic and inorganic acids were given in Fig. 4 and Fig. 5, respectively. As seen in Fig. 4, a linear increase in the vanadium extraction rate was observed up to the acid quantity of 800 kg/tons with citric acid. The vanadium extraction rate was found to be 36% at 800 kg/ton citric acid amount. However, approximately 4% decrease was observed after a further increase in acid amount to 1000 kg/ton. On the other hand, despite the fact that vanadium extraction has increased up to 200 kg/ton acid amount, no significant change was observed after this point in the leaching tests performed with tartaric acid. Consequently, the best vanadium extraction were obtained with oxalic acid among the organic acids investigated. The vanadium extraction rate was found to be 50% after the leaching process performed under 2-hours leaching time, 40°C pulp temperature and 200 kg/ton oxalic acid amount conditions.

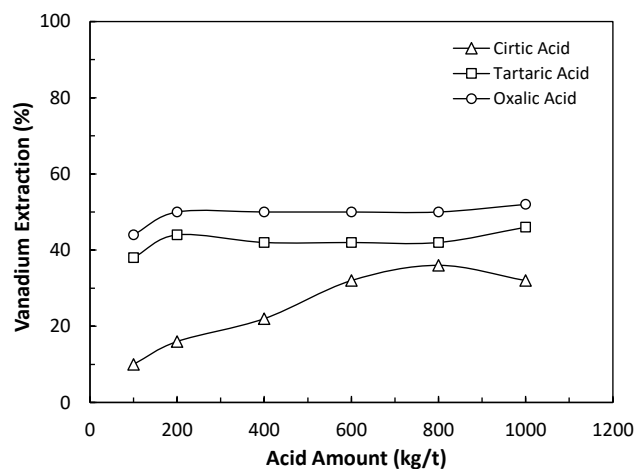


Figure 4. The results of leaching experiments performed with different organic acids

As seen in Fig. 5, no significant change was observed in vanadium extraction up to the acid amount of 600 kg/ton in

sulphuric acid leaching experiments. On the other hand, vanadium extraction has considerably increased at 800 kg/ton and it decreased to 46% at 1000 kg/ton acid amount. The decrease in vanadium extraction rate can be associated with the dissolution of unwanted minerals resulting of a possible precipitation of extracted vanadium, which should be investigated in terms of the solution chemistry. In hydrochloric acid leaching, vanadium extraction rate has increased up to 400 kg/ton acid amount. At this acid amount, vanadium extraction was 62%. However, similar to sulphuric acid leaching, vanadium dissolution efficiency showed a decrease tendency after further increase in acid amount. It is clear that the excessive lixiviant amount hindered the selectivity of leaching in both sulphuric and hydrochloric acid leaching experiments. In the leaching experiments performed with inorganic acids, the best results in terms of vanadium extraction were obtained with hydrofluoric acid. In comparison to vanadium extraction rate obtained with 100 kg/ton hydrofluoric acid amount, a significant increase of about 20% was achieved at 200 kg/ton. Although the increase trend in vanadium extraction rate has remained constant up to 800 kg/ton but it was slowed down after 200 kg/ton as seen in Fig. 5. It can be concluded that the optimum acid amount was 800 kg/ton in hydrofluoric acid leaching where the best result was obtained as 76% vanadium extraction rate.

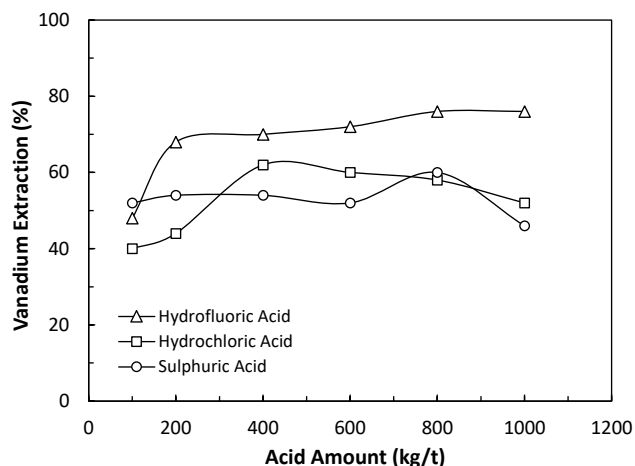


Figure 5. The results of leaching experiments performed with different inorganic acids

Fig. 6 shows the residues obtained after leaching process performed with hydrofluoric and oxalic acids. As seen in Fig. 6, hydrofluoric acid was more efficient than oxalic acid in terms of total decomposition of mafic minerals including vanadium bearing magnetite particles.

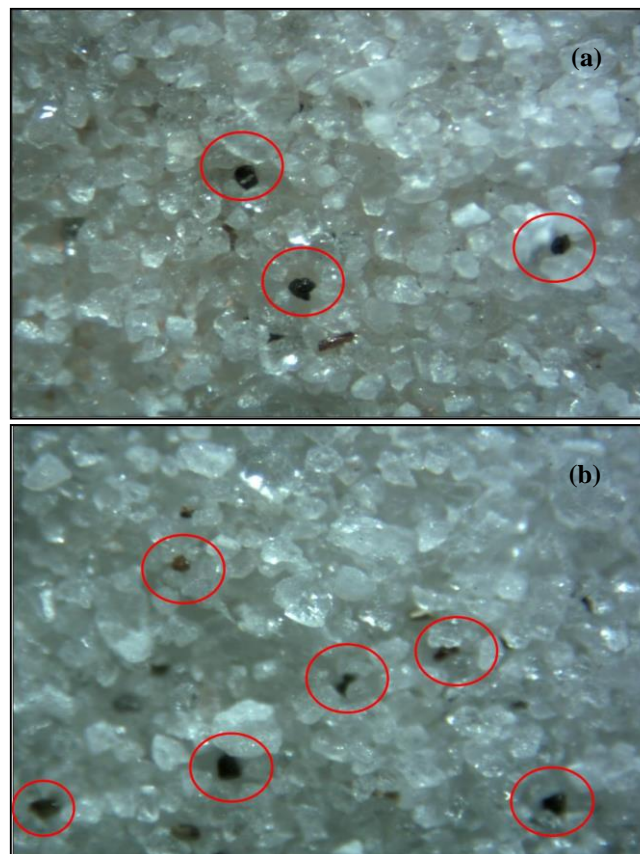


Figure 6. Images of residues after hydrofluoric (a) and oxalic (b) acid leaching

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

In this study, performance of organic acids in the extraction of vanadium from silica sand, a potential vanadium source, were investigated by leaching method. Leaching tests were performed using different organic and inorganic acids as lixiviants. In the experiments, leaching time (2-hours), pulp temperature (40°C) and mixing speed (250 rpm) parameters were kept constant and the effect of acid amount (100, 200, 400, 600, 800 and 1000 kg/t) of the organic (citric acid, tartaric acid and oxalic acid) and the inorganic acids (sulphuric, hydrochloric and hydrofluoric) were investigated.

Best vanadium extraction were obtained with oxalic acid among the organic acids investigated. The vanadium extraction rate was found to be 50% after the leaching process performed under 2-hours leaching time, 40°C pulp temperature and 200 kg/ton oxalic acid amount conditions. In the leaching experiments performed with inorganic acids, the best results in terms of vanadium extraction were obtained with hydrofluoric acid. It was concluded that the optimum acid amount is 800 kg/ton in hydrofluoric acid leaching where the best result was obtained as 76% vanadium extraction rate. It was also seen that the excessive lixiviant amount hindered the selectivity in both sulphuric and hydrochloric acid leaching experiments as vanadium extraction was negatively affected after a certain acid

amount in both cases. Therefore, the investigation of reasons behind these findings in terms of the solution chemistry is recommended for the future studies.


Ultimately, it can be concluded that the hydrofluoric acid was more efficient than oxalic acid in terms of total decomposition of mafic minerals including vanadium bearing magnetite particles which were observed in optic microscopy examinations on the leaching residues. However, the results obtained in this study have also revealed that the inorganic acids can be successfully applied for the extraction of vanadium from silica sands.


REFERENCES


- [1].B. Lagerkvist and A. Oskarsson, Handbook on the Toxicology of Metals, Elsevier, 2007.
- [2].Ozturk A. T., "Acquisition of Vanadium and Nickel out of Waste Ashes and Used Industrial Catalytic", MSc. thesis, Suleyman Demirel University, 2008.
- [3].H. Gharehbagheri, J. Safdari, R. Roostaazad and A. Rashidi, 2013, "Two-stage fungal leaching of vanadium from uranium ore residue of the leaching stage using statistical experimental design", Ann. Nucl. Energy, vol. 56, pp.48–52, Feb 2013.
- [4].R. R. Moskalyk and A. M. Alfantazi, "Processing of vanadium: a review", Miner. Eng., vol. 16, no. 9, pp. 793–805, Jul 2003.
- [5].USGS, 2018, "Vanadium", U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, (2018).
- [6].J. Yang, Y. Tang, K. Yang, A. A. Rouff, E. J. Elzinga and J. Huang, "Leaching characteristics of vanadium in mine tailings and soils near a vanadium titanomagnetite mining site", J. Hazard. Mater., vol. 264, pp. 498–504, 2014.
- [7].M. Li, C. Wei, G. Fan, H. Wu, C. Li and X. Li, "Acid leaching of black shale for the extraction of vanadium", Int. J. Miner. Process., vol. 95, pp. 62–67, May 2010.
- [8].X. Li, B. Xie, G. Wang and X. Li, "Oxidation process of low-grade vanadium slag in presence of Na_2CO_3 ", Trans. Nonferrous Met. Soc. China, vol. 21, no. 8, pp.1860-1867, Aug 2011.
- [9].M. Aarabi-Karasgani, F. Raschi, N. Mostoufi and E. Vahidi, "Leaching of vanadium from LD converter slag using sulphuric acid", Hydrometallurgy, vol. 102, no. 1-4, pp.14–21, Apr 2010.
- [10]. Y. Fan, X. Wang and M. Wang, "Separation and recovery of chromium and vanadium from vanadium-containing chromate solution by ion Exchange", Hydrometallurgy, vol. 136, pp.31–35, Apr 2013.
- [11]. Y. Min-Zhang, S. Bao, T. Liu, T. Chen and J. Huang, "The technology of extracting vanadium from stone coal in China: History, current status and future prospects", Hydrometallurgy, vol. 109, no. 1-2, pp.116–124, Sep 2011.
- [12]. L. Wang, W. Sun, R. Liu, X. Gu, "Flotation recovery of vanadium from low-grade stone coal", Trans. Nonferrous Met. Soc. China, vol. 24, no. 4, pp.1145–1151, Apr 2013.

Theoretical Investigation on Static Analysis of Pultruded GFRP Composite Beams

¹Emrah Madenci, ²Yasin Onuralp Özkılıç *³Lokman Gemi

¹Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering, Necmettin Erbakan University, Konya, Turkey, emadenci@erbakan.edu.tr, 

²Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering, Necmettin Erbakan University, Konya, Turkey, yoozkilic@gmail.com, 

*³Meram Vocational School, Necmettin Erbakan University, Konya, Turkey, lgemi@erbakan.edu.tr, 

Research Paper

Arrival Date: 09.05.2020

Accepted Date: 01.07.2020

Abstract

Composite materials, which have been used especially in the construction sector to strength beams and columns, have been produced in pultruded GFRP profiles with different geometries with the pultrusion method. Pultruded GFRP profiles are an alternative to traditional building elements in many construction applications thanks to their superior properties such as high strength, chemical resistance, thermal and electrical insulation. Pultruded GFRP profiles are exposed to various loads and change shapes due to the effect of these loads. It is very important to determine the load and deformation capacities as structural members. These profiles are often exposed to bending while serving as beams. In this study, a multiscale analysis of the deflection and stress behavior of pultruded GFRP composite beam is presented. The proposed formulations are verified using the results of experimental and numerical studies. The comparison of the analytical results to both experimental and finite element results revealed that the differences between analytical results and the experimental and numerical findings are less than 1%, which indicates an excellent agreement.

Keywords: Pultruded GFRP, Pultrusion, Bending, Experiment, Analytical, Composite, Delamination

1. INTRODUCTION

Pultruded composite profiles particularly made of glass fiber reinforced polymer (GFRP) are widely used as critical elements in civil engineering applications due to their superior mechanical strength such as high strength/density ratio, lightness, low density, corrosion resistance and high resistance to chemicals and electrical insulation [1-5].

Besides its superior mechanical performance on the production techniques of these materials, increasing technological developments can also be shown in recent years. The pultrusion method has been developed to produce profile type materials economically. Pultrusion requiring one-way mechanical property is a preferred continuous production method for the production of special materials such as rebar, profile and small diameter pipes [6-8]. It is the fastest improving composite production method, thanks to its economics and usage by many markets [9]. Continuous roving, woven roving, felt or a combination of these, which are used as glass fiber reinforcement in pultrusion, are preferred through thermoset resin bath and then through a series of shaping guides. It is passed through the heated steel

mold and it is hardened in the determined section. Forming guides are used to ensure the highest level of penetration of the resin into the glass reinforcement material. The product coming out of the mold is cut to desired lengths by means of cutting apparatus. Pultrusion method requires low labor. Methods of the production of pultruded profile, machine configurations, pultrusion composite diagram and general configuration of structural fibers distributed throughout the thermoset resin are given in Fig. 1.

The static, stability and vibration analyses play a significant role under various types of loading conditions in the design of composite structures. The research and studies on composite structures are divided into two groups as experimental and theoretical in the literature [13-17]. A number of investigations on theoretical or experimental studies of pultruded GFRP composite structures can be found in the literature [18-22]. A comprehensive study was conducted by Madenci et al. [23]. They investigated the flexure performances of pultruded GFRP composite beams with experimentally and theoretically. Theoretical approaches for flexural analysis of pultruded GFRP composite beams were developed with the help of variational

methods, classical finite element modeling (FEM) was performed with the help of ABAQUS program and three-point bending test was utilized to investigate flexure performance.

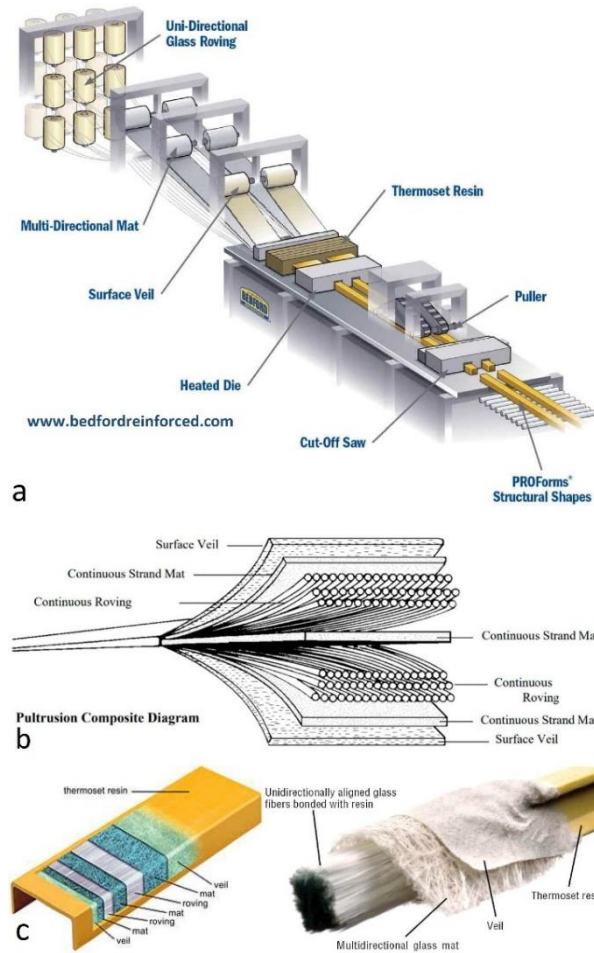


Fig. 1. Pultrusion molding method a) pultrusion machine configurations b) pultrusion composite diagram c) general configuration of structural fibers distributed throughout the thermoset resin [10-12].

The studies related to mechanic behavior analysis of pultruded GFRP composite beams with experimental and theoretical are very limited. This study aims to analyze the behavior of pultruded GFRP composite structures under external loads using a theoretical approach. The deflection and stress behaviors of pultruded GFRP composite beams were examined by using multiscale analysis. The results of the theoretical approach were verified using findings of the experimental study, where the pultruded GFRP beams were tested under three-point bending, and numerical analysis, where finite element modeling using ABAQUS were conducted. In the theoretical analysis section of the [23], field equations were obtained with the help of variational methods and analyzes were carried out with the help of the mixed finite element method, which is a specific approximate solution method. In the theoretical analysis part of this study, an analytical solution was made using simple

body equations. In addition, in the study conducted by [23], a macro-mechanical model was used for the material properties, and the results were compared with the results obtained from the experimental analysis. In this study, without any macro-mechanical model for the theoretical solution, the material properties were determined by experimental analysis and used in the theoretical solution.

2. BASIC EQUATIONS

The deflection and stress behavior of pultruded GFRP composite beam are summarized according to the classical laminated plate theory in this section. If the in-plane forces and displacements are zero the problem is reduced to one of solving for bending deflection and stresses.

The constitutive relations for laminated beam under bending loads are given by Reddy [24] as

$$\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

We can write Eq. (1) in inverse form as

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} D_{11}^* & D_{12}^* & D_{16}^* \\ D_{12}^* & D_{22}^* & D_{26}^* \\ D_{16}^* & D_{26}^* & D_{66}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

where “ D_{ij}^* ” the elements of the inverse matrix of “ D_{ij} ”. In deriving the laminated beam theory we assume that

$$M_{yy} = M_{xy} = 0 \quad (3)$$

The differential equation governing the deflection of the beam with along the x-axis can be written as

$$\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} = -D_{11}^* M_{xx} \quad (4a)$$

$$\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} = -D_{12}^* M_{xx} \quad (4b)$$

$$2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} = -D_{16}^* M_{xx} \quad (4c)$$

where “ D_{ij}^* ” are given by

$$D_{11}^* = \frac{D_{22}D_{66} - D_{26}D_{26}}{\Delta} \tag{5a}$$

$$D_{12}^* = \frac{D_{16}D_{26} - D_{12}D_{66}}{\Delta} \tag{5b}$$

$$D_{16}^* = \frac{D_{12}D_{26} - D_{22}D_{16}}{\Delta} \tag{5c}$$

with “ Δ ” being the determinant of the “ $[D_{ij}]$ ” matrix can be expressed as

$$\Delta = D_{11}D_{22}D_{66} + 2D_{12}D_{16}D_{26} - D_{11}D_{26}D_{26} - D_{22}D_{16}D_{16} - D_{66}D_{12}D_{12} \tag{6}$$

In Eqs. (4) indicate that the transverse deflection “ w_0 ” isn’t independent of the y-axis while the Poisson effect “ D_{12}^* ” and anisotropic shear coupling “ D_{16}^* ” independent of the y-axis. These effects can be neglected only when the length-to-width ratio of beam is large. We assume that the laminated beam under consideration is long enough to make the effects of the Poisson ratio “ D_{12}^* ” and shear coupling “ D_{16}^* ” on the deflection negligible. In the familiar form used in the Euler-Bernoulli beam theory, the differential Eq.(4a) can be written in terms of the effective Young’s modulus “ E_{xx}^b ”, moment of inertia “ I_{yy} ” defined as

$$M(x) = -E_{xx}^b I_{yy} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \tag{7}$$

For static bending without axial force, the general solutions are obtained by direct integration by [25]

$$E_{xx}^b I_{yy} w_0(x) = \int_0^x \left[\int_0^\eta M(\xi) d\xi \right] d\eta + b_1 x + b_2 \tag{8}$$

where the constants are evaluated using boundary conditions for simply supported beam and three point bending

$$w_0(0) = 0; \quad \frac{dw_0}{dx}(\frac{l}{2}) = 0 \tag{9}$$

The in-plane stress in the nth layer computed as

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = z \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \tag{10}$$

$$= \frac{z}{b} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{bmatrix} D_{11}^* & D_{12}^* & D_{16}^* \\ D_{12}^* & D_{22}^* & D_{26}^* \\ D_{16}^* & D_{26}^* & D_{66}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

The components of the matrix in Eq. (10) in terms of the stiffness coefficients in the direction of principal axes of material orthotropy can be written as Eq. (11)

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11}^{(k)} &= Q_{11}^{(k)} c^4 + 2(Q_{12}^{(k)} + 2Q_{66}^{(k)})c^2 s^2 + Q_{22}^{(k)} s^4 \\ \bar{Q}_{12}^{(k)} &= (Q_{11}^{(k)} + Q_{22}^{(k)} - 4Q_{66}^{(k)})c^2 s^2 + Q_{12}^{(k)}(c^4 + s^4) \\ \bar{Q}_{22}^{(k)} &= Q_{11}^{(k)} s^4 + 2(Q_{12}^{(k)} + 2Q_{66}^{(k)})c^2 s^2 + Q_{22}^{(k)} c^4 \\ \bar{Q}_{16}^{(k)} &= (Q_{11}^{(k)} - Q_{12}^{(k)} - 2Q_{66}^{(k)})c^3 s + (Q_{11}^{(k)} - Q_{22}^{(k)} + 2Q_{66}^{(k)})c s^3 \\ \bar{Q}_{26}^{(k)} &= (Q_{11}^{(k)} - Q_{12}^{(k)} - 2Q_{66}^{(k)})c s^3 + (Q_{11}^{(k)} - Q_{22}^{(k)} + 2Q_{66}^{(k)})c^3 s \\ \bar{Q}_{66}^{(k)} &= (Q_{11}^{(k)} + Q_{22}^{(k)} - 2Q_{12}^{(k)})c^2 s^2 + Q_{66}^{(k)}(c^2 - s^2)^2 \end{aligned} \tag{11}$$

where “ c ” is “ $\cos \theta$ ” and “ s ” is “ $\sin \theta$ ” and “ θ ” is the angle between material orientation and x-axis. The terms of engineering constants of the kth orthotropic lamina are

$$Q_{11}^{(k)} = \frac{E_1^{(k)}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{12}^{(k)} = \frac{\nu_{12}E_2^{(k)}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{22}^{(k)} = \frac{E_2^{(k)}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \tag{12}$$

$$Q_{44}^{(k)} = G_{13}, \quad Q_{55}^{(k)} = G_{23}, \quad Q_{66}^{(k)} = G_{12}$$

The laminate material stiffnesses “ D_{ij} ” are given based on transformed rigidity

$$\{D_{ij}\} = \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} [\bar{Q}_{ij}]^{(k)} z^2 dz \tag{13}$$

3. EXPERIMENTAL STUDY

In order to verify theoretical results, the experimental study which was conducted by the Authors [23] was utilized. For the sake of completeness, the details of the experimental study are explained herein. According to burnout test the volume fraction of fiber and matrix were determined as 54% and 46%, respectively. Interested readers can refer to Madenci et al [23] for more detail. In the experimental study, three different type of specimens were tested under three point loading using SHIMAZDZU universal test machine

shown in Fig. 2. The specimens were taken from the pultruded GFRP profile. Specimens CB1 and CB2 were taken from longitudinal direction while CB3 specimen was taken from the transverse direction. Dimension and fiber orientation of specimens are given in Table 1.



Fig. 2. Test setup

Table 1. Properties of the specimens

Specimen	Fiber Orientation	Thickness (mm)	Width (mm)	Span Length
CB1	0°	6	25	190
CB2	0°	6	13	96
CB3	90°	6	150	100

Tensile tests were performed in order to measure tensile strength and elasticity modulus for longitudinal and transverse directions. Modulus of elasticities were measured as 23 GPa and 7 GPa for longitudinal and transverse directions, respectively. Stress and strain curves of the results of tensile test for the longitudinal and transverse directions are given in Fig. 3. For more details, Özkılıç et al [26] can be referred.

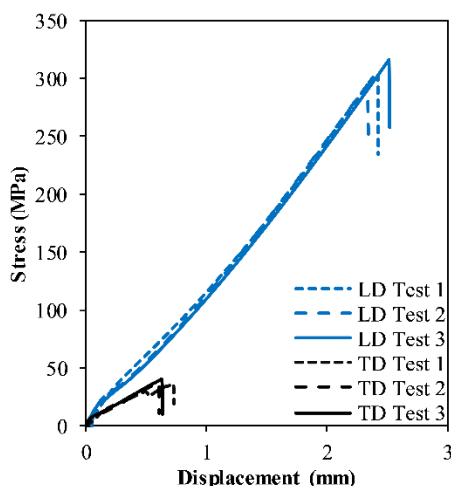


Fig. 3. The tensile test results of longitudinal direction (LD) and transverse direction (TD)

4. NUMERICAL STUDY

In the content of the study [23], the numerical study was also conducted to further verify the theoretical formulation. In this present study, the results of numerical study were also

included herein. The numerical study was carried out using a commercial finite element (FE) software, ABAQUS. ABAQUS is a powerful and reliable tool used by many researchers to solve civil engineering problems [27]. The specimen was modeled using S4R shell elements. The supports and loading nose were modeled using C3D8R solid elements. Mesh size was determined after the convergence analyses. 5 mm mesh size was utilized to model the beams. Lamina type of material model was considered for modelling the beams. Elastic modulus of 23 GPa and 7 GPa was used for the longitudinal and transverse directions. Numerical model is shown in Fig. 4. More detail related to numerical model can be found in the study conducted by Madenci et al. [23].

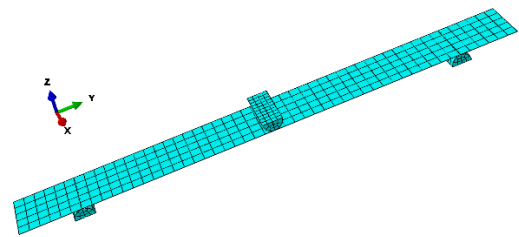


Fig. 4. Numerical model

5. RESULTS

In the results, 3 replicates were made for each sample combination. Load and displacement measurements were carried out 3 replicates for each sample and these values are given in Table 2. The obtained results are compared in terms of maximum displacement and maximum normal stress. Maximum displacements of the specimens are compared in Table 3. It is seen that the results of the analytical and FEM match very closely each other. On the other hand, experimental results are slightly higher than those of the calculated results which are analytical and FEM results. The differences between experimental findings and the calculated results are less than 1% which indicates an excellent agreement between experimental and the calculated results.

Table 2. Standard deviation (SD) of specimens

Specimen	Load (N)	SD	Disp. (mm)	SD
CB1-1	945.3045		10.8512	
CB1-2	973.4536	13.78	11.9744	0.64
CB1-3	975.5137		12.3642	
CB2-1	930.3281		3.5642	
CB2-2	942.1822	18.39	3.8998	0.16
CB2-3	973.9020		3.9059	
CB3-1	372.5171		2.7421	
CB3-2	342.3757	13.39	2.1765	0.27
CB3-3	368.6370		2.7613	

Table 3. Maximum displacements of specimens

Specimen	Maximum displacement (mm)		
	Experimentally	Analytical	FEM
CB1	11.73	11.71	11.70
CB2	3.79	3.76	3.75
CB3	2.56	2.45	2.46

Table 4 demonstrates maximum normal stress occurred at the specimens. Similar to previous results, herein very close results from analytical and FEM studies are obtained whereas experimental results are slightly lower than the calculated results. Again the difference between experimental findings and the calculated results are less than 1%.

Table 4. Maximum normal stresses of specimens

Specimen	Maximum normal stress (MPa)		
	Experimentally	Analytical	FEM
CB1	362	363	363.06
CB2	422	421.3	421.24
CB3	68	68.5	68.42

The values obtained as a result of the analytical solution were very close to each other with the results of the theoretical solution in the study conducted by Madenci et. al. [23]. In the study conducted by the [23], the material properties were obtained by establishing a detailed mechanical model, while the material properties were obtained experimentally in this study. Thus, the results of the analytical solution and the results of the theoretical solution used in the study conducted by the Madenci et. al. [23] came close.

The comparison of the load-displacement curves for CB1, CB2 and CB3 are given in Figs. 5, 6 and 7, respectively. It is seen that, all repeat tests give similar results in terms of maximum loading and corresponding displacement. It can be seen from these figures that both analytical and finite element (FE) results can successfully predict the elastic region of the pultruded GFRP.

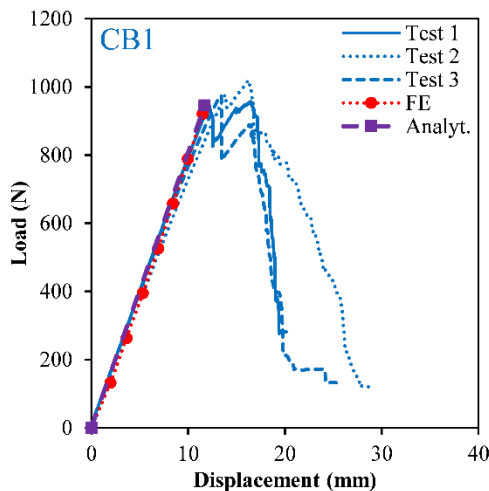


Fig. 5. The comparison of the load-displacement curves for CB1

The composite structures produced in different production methods and geometries are subjected to damage analysis after the experimental study [28-33]. Each type of composite materials has their own unique damages. It is very important to provide feedback through the composite production method stage in order to determine the damage modes and to

minimize these losses by developing the production method [34-46].

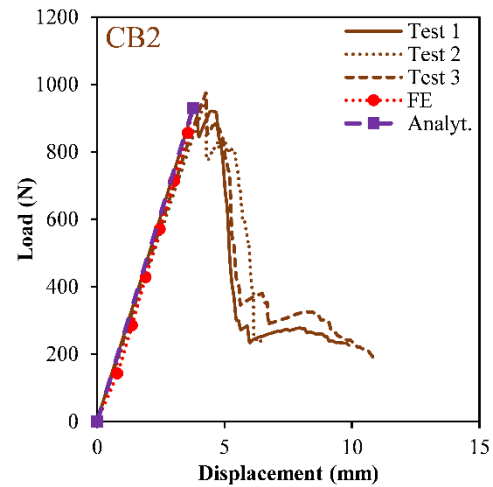


Fig. 6. The comparison of the load-displacement curves for CB2

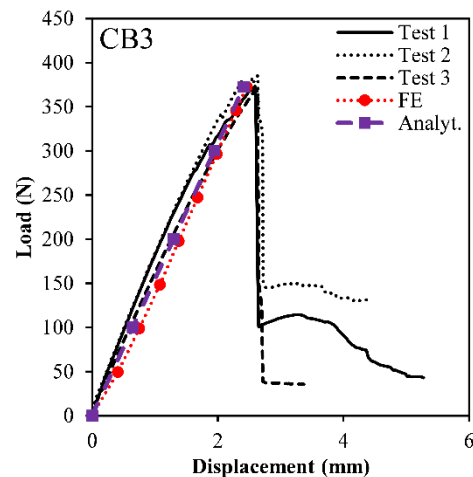


Fig. 7. The comparison of the load-displacement curves for CB3

Fig. 8 demonstrates damage analyses for this present study. For CB1 and CB2, a slight reduction in loading after reaching maximum loading was observed. This reduction was occurred due to the cracks formed in the first glass mat layer. With the first damage occurring and displacement continues to increase, interlaminar cracks (delamination) damages gradually occur between the glass mat and glass roving layers. Glass mat layers with different fiber configuration (multidirectional) started to be damaged before glass roving layers. As the increase in displacement continues, intralaminar cracks began to form between the glass roving layers. With the formation of fiber breakages starting in the first glass roving layer under ongoing loading conditions, sudden drops in the load were observed. After this drop in the load, the result damage occurred as a result of similar damages gradually occurring in other layers.

On the other hand, CB3 which is different from CB1 and CB2 suddenly failed at averagely at 361 kN due to matrix cracks in the fiber direction of 90° (glass roving). Due to the direction of the extraction of this specimen, the fiber orientations in the glass roving layer were not able to carry the load since they were parallel to the applied load. In this specimen, the load carriage was carried out through glass mat layers. The glass roving layer behaved like a filling material; therefore, it caused a low load carrying capacity.

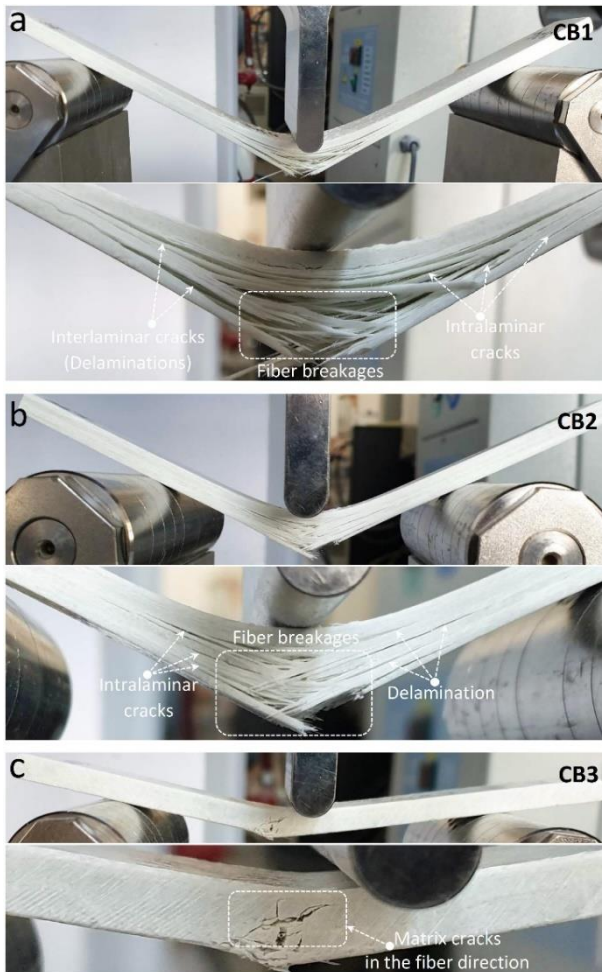


Fig. 8. Damages occurred during the experiments

6. CONCLUSION

This paper presents a classical laminated plate theory to solve bending deflection and stress. The presented analytical study was verified with the experimental study as well as numerical study. The comparisons of these studies revealed that the presented theoretical study can be used successfully to predict bending deflection and stress. The numerical results were also compared with the results obtained with the experiments and ABAQUS simulation results, and the results were found to be very similar.

The results of the study by Madenci et. al. [23] were very close to the results in this article. A simpler solution method

was used in this study by using basic equations instead of the complex solution used in [23] article. No mechanical model was used in analytical calculations and the values obtained from the experimental results were used. Thanks to the common use of experimental and analytical work, there is no need for complex equation solutions.

In the CB1 and CB2 specimens, the glass roving and glass mat layers moved together and reached an average load capacity of 464 kN and 448 kN, respectively. Unlike the other specimens, only the glass mat layer carried a load and reached an average load capacity of 361 kN in specimen CB3. While damage development was observed in the CB1 and CB2 specimens as interlaminar (delamination) and intralaminar cracks damage modes, in the CB3 specimen, the initiation of the damage was observed in the glass roving layer in the form of dense matrix cracks in the direction of fiber.

REFERENCES

- [1] S. Satasivam, Y. Bai, and X.-L. Zhao, "Adhesively bonded modular GFRP web-flange sandwich for building floor construction", *Composite Structures*, vol. 111, pp. 381-392, 2014.
- [2] J.R. Correia, F.A. Branco, and J.G. Ferreira, "Flexural behaviour of GFRP-concrete hybrid beams with interconnection slip", *Composite Structures*, vol. 77, pp. 66-78, 2007.
- [3] J.R. Correia, F.A. Branco, and J.G. Ferreira, "Flexural behaviour of multi-span GFRP-concrete hybrid beams", *Engineering Structures*, vol. 31, pp. 1369-1381, 2009.
- [4] F. Aydın, A. Sarıbiyık, M. Sarıbiyık, and M. İpek, "Experimental Study of Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams and Hybrid Beams", *Acta Physica Polonica A*, vol. 134(1) pp. 244-247, 2018
- [5] M. Sarıbiyık, and P. D. Gosling, "Experimental study of a bonded plastic fiber reinforced polymer connector assembly", *Journal of Composites for Construction*, vol. 8(6), pp. 549-559, 2004.
- [6] A. Vedernikov, A. Safonov, F. Tucci, P. Carlone, and I. Akhatov, "Pultruded materials and structures: A review", *Journal of Composite Materials*, In Press, 2020.
- [7] M. Sarıbiyık, "Design of light-weight structure by pultruded glass reinforced plastic", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 22(1), pp.199-205, 2007.
- [8] M. Sarıbiyık, A. Cumhuri, F. Aydın, and A. Sarıbiyık, "Pultruzyon Metodu İle Üretilen Cam Fiber Takviyeli Plastik Profillerin Sera Modellemesinde Kullanılması", *International Symposium On Advances In Earthquake & Structural Engineering*, pp. 674-682, Antalya, Turkey, October 24-26 2007.
- [9] G. Boscato and S. Ientile, "Experimental and numerical investigation on dynamic properties of thin-walled GFRP buckled columns", *Composite Structures*, vol. 189, pp. 273-285, 2018.
- [10] Bedford, URL: <http://bedfordreinforced.com> (Visited on Feb. 15, 2020)

- [11] M. Sarıbiyık, F. Aydın, N. Çağlar, and A. Sarıbiyık, "Use of the Pultruded Glass Reinforced Plastic in the Modelling of Earthquake Resistant Structure", In 8th International Congress on Advances in Civil Engineering, Eastern Mediterranean University, Famagusta, North Cyprus, pp. 15-17, 2008.
- [12] M. Bell, D. Fick, R. Ament, and N.M. Lister, "The Use of Fiber-Reinforced Polymers in Wildlife Crossing Infrastructure", *Sustainability*, vol. 12(4), pp. 1557, 2020.
- [13] J. Arbaoui, M. Tarfaoui, and A. El Malki Alaoui, "Dynamical characterisation and damage mechanisms of E-glass/vinylester woven composites at high strain rates compression", *Journal of Composite Materials*, vol. 50, pp. 3313-3323, 2016.
- [14] E. Madenci, "A refined functional and mixed formulation to static analyses of fgm beams", *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 69, pp. 427-437, 2019.
- [15] A. Özütok and E. Madenci, "Static analysis of laminated composite beams based on higher-order shear deformation theory by using mixed-type finite element method", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 130, pp. 234-243, 2017.
- [16] L. Gemi, C. Aksoylu, Ş. Yazman, Y.O. Özkılıç, and M.H. Arslan, "Experimental investigation of shear capacity and damage analysis of thinned end prefabricated concrete purlins strengthened by CFRP composite", *Composite Structures*, p. 111399, 2019.
- [17] V. Kahya, S. Karaca, F.Y. Okur, A.C. Altunışık, and M. Aslan, "Free vibrations of laminated composite beams with multiple edge cracks: Numerical model and experimental validation", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 159, pp. 30-42, 2019.
- [18] L. Almeida-Fernandes, N. Silvestre, and J.R. Correia, "Characterization of transverse fracture properties of pultruded GFRP material in tension", *Composites Part B: Engineering*, vol. 175, p. 107095, 2019.
- [19] C. Wang, "Test on pultruded GFRP I-section under web crippling", *Composites Part B: Engineering*, vol. 77, pp. 27-37, 2015.
- [20] H. Xin, A.S. Mosallam, Y. Liu, C. Wang, and J. He, "Experimental and numerical investigation on assessing local bearing behavior of a pultruded GFRP bridge deck", *Composite Structures*, vol. 204, pp. 712-730, 2018.
- [21] A. Sarıbiyık and M. Sarıbiyık, "Design of permanent greenhouse structure by pultruded glass reinforced plastic", *Scientific Research and Essays*, vol. 6, pp. 3629-3637, 2011.
- [22] A. Sarıbiyık and N. Çağlar, "Flexural strengthening of RC beams with low-strength concrete using GFRP and CFRP", *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 58, pp. 825-845, 2016.
- [23] E. Madenci, Y.O. Özkılıç, and L. Gemi, "Experimental and Theoretical Investigation on Flexure Performance of Pultruded GFRP Composite Beams with Damage Analyses", *Composite Structures*, vol. 242, pp. 112162, 2020.
- [24] J. N. Reddy, *Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis*: CRC press, 2004.
- [25] J. N. Reddy, "Energy principles and variational methods in applied mechanics", John Wiley & Sons, 2002.
- [26] Y.O. Özkılıç, E. Madenci, and L. Gemi, "Tensile and compressive behaviors of the pultruded GFRP lamina", *Turkish Journal of Engineering (TUJE)*, vol. 4, pp. 169-175, 2020.
- [27] Y.O. Özkılıç, "A new replaceable fuse for moment resisting frames: Replaceable bolted reduced beam section connections", *Steel and Composite Structures*, vol. 35(3), pp. 353-370, 2020.
- [28] L. Gemi, "Investigation of the effect of stacking sequence on low velocity impact response and damage formation in hybrid composite pipes under internal pressure. A comparative study", *Composites Part B: Engineering*, vol. 153, pp. 217-232, 2018.
- [29] L. Gemi, Ö.S. Şahin, and A. Akdemir, "Experimental investigation of fatigue damage formation of hybrid pipes subjected to impact loading under internal pre-stress", *Composites Part B: Engineering*, vol. 119, pp. 196-205, 2017.
- [30] L. Gemi, M. Kayrıçı, M. Uludağ, D.S. Gemi and Ö.S. Şahin, "Experimental and statistical analysis of low velocity impact response of filament wound composite pipes", *Composites Part B: Engineering*, vol. 149, pp. 38-48, 2018.
- [31] L. Gemi, U. Köklü, Ş. Yazman and S. Morkavuk, "The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-1 mechanical characterization and drilling tests", *Composites Part B: Engineering*, vol. 186, pp. 107787, 2020.
- [32] L. Gemi, S. Morkavuk, U. Köklü and Ş. Yazman, "The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-1 damage analysis and surface quality", *Composite Structures*, vol. 235, pp. 111737, 2020.
- [33] C. Aksoylu, Ş. Yazman, Y.O. Özkılıç, L. Gemi and M.H. Arslan, "Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite", *Composite Structures*, vol. 249, pp. 112561, 2020.
- [34] L. Gemi, E. Madenci and Y.O. Özkılıç, "Çelik, Cam FRP ve Hibrit Donatılı Betonarme Kirişlerin Eğilme Performansının İncelenmesi", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 8(2), pp. 1470-1483, 2020.
- [35] E. Madenci, L. Gemi and Y.O. Özkılıç, "An Investigation on Flexure Behavior of Pultruded Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Beams", 1st International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology, pp. 379-384, 23-25 October, Afyon, Turkey, 2019.
- [36] E. Madenci, Y.O. Özkılıç and L. Gemi, "The Effects of Length to Depth Ratio on the Reinforced Concrete Pultruded GFRP Beams", 1st International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology, pp. 386-391, 23-25 October, Afyon, Turkey, 2019.
- [37] Y.O. Özkılıç, E. Madenci and L. Gemi, "Performance of Pultruded Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Beams under Quasistatic Load", 5th International

Conference on Engineering Science, pp. 207-2212, 19 September, Ankara, Turkey, 2019.

[38] Y.O. Özkılıç, L. Gemi and E. Madenci. "Hybrid Reinforced Concrete Filled Pultruded GFRP Beams Strengthened by GFRP Composites", 5th International Conference on Engineering Science, pp. 213-217, 19 September, Ankara, Turkey, 2019.

[39] L. Gemi, E. Madenci and Y.O. Özkılıç, "Investigation of Reinforced Concrete-Filled Pultruded Beams Strengthened By GFRP Composite", The International Aluminium-Themed Engineering and Natural Sciences Conference, pp. 313-316, October 4-6, Seydişehir, Turkey, 2019.

[40] L. Gemi, Y.O. Özkılıç and E. Madenci. "An Experimental Investigation on Buckling Behavior of the Pultruded GFRP Beam", The International Aluminium-Themed Engineering and Natural Sciences Conference, pp. 306-308, 4-6 October, Seydişehir, Turkey, 2019.

[41] A. Sarıbiyik, B. Abodan, and M.T. Balci, "Experimental study on shear strengthening of RC beams with basalt FRP strips using different wrapping methods", Engineering Science and Technology, an International Journal, In Press, 2020.

[42] A. Castellano, A. Fraddosio, S. Marzano, and M.D. Piccioni, "Some advancements in the ultrasonic evaluation of initial stress states by the analysis of the acoustoelastic effect", Procedia Engineering vol. 199, pp. 1519-1526, 2017.

[43] L. Gemi, and M.A. Köroğlu, "Çekme bölgesi lifli beton olan cam fiber takviyeli polimer (GFRP) ve çelik donatılı etriyesiz kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışı ve hasar analizi", Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, vol. 6, pp. 654-667, 2018.

[44] L. Gemi, M.A. Köroğlu, and A. Ashour, "Experimental study on compressive behavior and failure analysis of composite concrete confined by glass/epoxy $\pm 55^\circ$ filament wound pipes", Composite Structures, vol. 187, pp. 157-168, 2018.


[45] A. Castellano, P. Foti, A. Fraddosio, U. Galietti, S. Marzano, and M.D. Piccioni, "Characterization of Material Damage by Ultrasonic Immersion Test", Procedia Engineering, vol. 109, pp. 395-402, 2015.

[46] E. Madenci, Y.O. Özkılıç, L. Gemi, "Buckling and free vibration analyses of pultruded GFRP laminated composites: Experimental, numerical and analytical investigations", Composite Structures, vol. 254, pp. 112806, 2020.


Numerical Analysis of Heat Transfer of a Brazed Plate Heat Exchanger

¹Gökhan Sevilgen, *²Halil Bayram

¹Department of Automotive Engineering, Faculty of Engineering, Bursa Uludağ University, 16059, Bursa, Turkey,

gsevilgen@uludag.edu.tr, 

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, Amasya University, 05100, Amasya, Turkey

halil.bayram@amasya.edu.tr, 

Research Paper

Arrival Date: 01.02.2020

Accepted Date: 14.05.2020

Abstract

In this paper, the heat transfer characteristics of a brazed plate heat exchanger were investigated by using Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Due to its compact structure, the plate type heat exchangers are used in many engineering applications such as manufacturing, automotive, etc. Heat exchangers are generally analyzed considering both rating and sizing parameters. We only examined the rating parameters such as flow direction, mass flow rate, and the inlet temperature value of hot water on the thermal performance of a brazed plate heat exchanger, numerically. We also conducted experiments under the same conditions for getting comparative results with the numerical simulations. Theoretical calculations were achieved by using the Logarithmic Mean Temperature Difference (LMTD) method for a single-phase flow and the thermal efficiency of the heat exchanger was evaluated for different conditions. The maximum total heat transfer rate was calculated about 3.1 kW for experimental study whereas this value was about 3 kW for numerical study under the counter flow conditions. Considering the increase in percentage for the total heat transfer rate, the mass flow rate had more effects than the other rating parameters such as flow direction and hot water inlet temperature values. Another important result was that the effectiveness values of the heat exchanger were calculated higher under the counter flow conditions. The numerical results were in good agreement with the experimental data used in the study.

Keywords: Brazed plate heat exchanger, counter-flow, LMTD method, thermal performance, CFD

1. INTRODUCTION

Heat exchangers are devices that perform heat transfer between two or more fluid zones and can be classified according to their different properties such as processes type, flow arrangements, and heat transfer mechanisms [1, 2]. On the other hand, mild steels and alloy steels, copper alloys and for special purposes ceramic and graphite were commonly used materials for the construction of heat exchangers. A great number of factors need to be considered such as durability under different environmental conditions, corrosion resistance, heat transfer coefficients, the efficiency of the heat exchanger, total pressure drop etc. during the manufacturing process. Moreover, the manufacturing methods include increasing the total surface area by using porous substrates or formation of adding surfaces to enhance the total heat transfer rate [3]. Direct Metal Laser Sintering (DMLS) method was suitable for producing complex geometries as an alternative to existing manufacturing methods. This method was more preferred when to produce a compact heat exchanger which had smaller volume and higher thermal performance [4]. For many industrial applications plate heat exchangers have shown advantages such as small size and weight, high thermal efficiency, less maintenance cost, higher total heat transfer coefficient,

easily installation, compactness, etc. over the other types of heat exchangers [2, 5-9]. The plate heat exchanger consists of a series of adjacent corrugated or wavy thin metal plates with complex geometries. The heat transfer occurs through plates and brazed plate heat exchangers are more suitable for use with higher temperature and pressure values than the other type of plate heat exchangers. On the other hand, brazing the stainless-steel plates together eliminates the need for sealing gaskets and thick frame plates. Due to geometrical structures of plate surfaces, some mechanisms occur such as swirl and vortex flows, disruption and reattachment of boundary layers, small hydraulic diameter flow passages, and increased effective heat transfer area. And these mechanisms were the basic factors to get the higher heat transfer coefficient values compared to the tubular heat exchangers. The weight and the volume values of the plate heat exchanger for the same effective heat transfer area are approximately 30% and 20%, respectively, compared to the values of shell and tube heat exchangers. Moreover, there is no need for insulation because only the edges of the plates are in contact with the outdoor. And the heat transfer between the heat exchanger and outdoor can be acceptable as negligible [10]. A well designed and built computational fluid dynamics (CFD) numerical model can be a useful tool to obtain the flow and heat transfer

*Corresponding Author: Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Amasya Üniversitesi, 05100, Amasya, Turkey, halil.bayram@amasya.edu.tr

characteristics of a heat exchanger. The CFD method can be utilized to get the appropriate flow and heat transfer characteristics considering the desired heat transfer rate and pressure drop [11]. The CFD method can be used both in the rating and iteratively in the sizing of heat exchangers. In this numerical study, a three-dimensional CFD model of a brazed plate heat exchanger was developed, and the numerical results were also compared to the experimental data obtained from this study. We also employed theoretical calculations for the total heat transfer rate by using the LMTD method and evaluated thermal efficiency for different conditions. The novelty and the main contributions to the current literature of the present study may be stated as follow:

- To represent a numerical and experimental approach for the evaluation of a brazed plate heat exchanger considering rating parameters.
- The more realistic a three-dimensional CFD model includes both solid and fluid zones is performed to get the fluid flow and heat transfer analysis of a small type brazed plate heat exchanger.
- To present detailed calculations based on the LMTD method and effectiveness for getting comparative results in such numerical calculations.

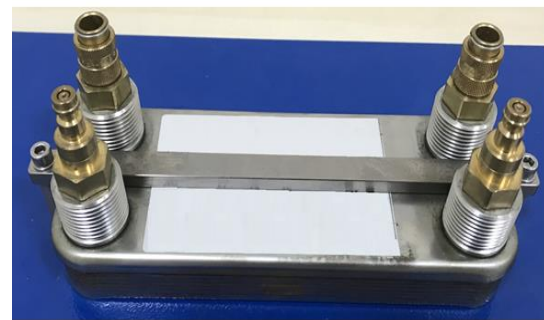
2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Numerical Simulation

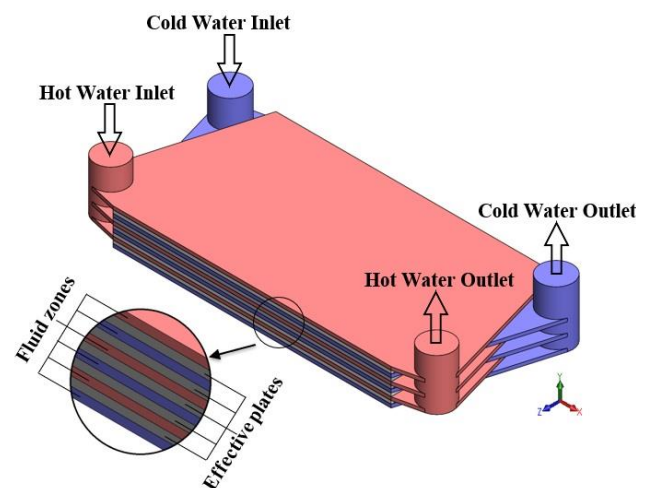
The Computer Aided Design (CAD) model of a brazed plate heat exchanger was developed by using the dimensions of the heat exchanger used in the experimental study and this heat exchanger is shown in Figure 1a. The plate heat exchanger had seven plates and the material of these plates was stainless steel in this study. The dimensions and the technical properties of this heat exchanger are listed in Table 1 and the CAD model is shown in Figure 1b. The computational domain consists of solid and fluid zones. In the solid zones, there were seven plates include cover and effective ones demonstrated in Figure 1b. However, the effective plates which shown in grey were only used in CFD calculations. In the fluid zones, the red and blue regions represent the hot and cold water, respectively.

Table 1. Technical details of the plate heat exchanger

Brazed Plate Heat Exchanger	
Plate type	Brazed
Total heat transfer area	0.048 m ²
Plate material	Stainless steel
Number of plates	7



(a)



(b)

Figure 1. (a) A brazed plate heat exchanger used in the experimental study (b) CAD model of a brazed plate heat exchanger used in the numerical study

The mesh structure of the numerical model is shown in Figure 2. Due to the importance of the stability and precision of the numerical results, we used the Cartesian mesh structure which consists of mostly hexahedral elements. The numbers of total elements were determined considering mesh independent results. Due to mesh structure significantly effects the numerical results and also computing time, mesh dependence test was performed. As a result, it was found that six million elements were quite enough to get the mesh-independent results and slightly high number of total elements had occurred because the plates are quite thin that to provide the heat conduction analysis.

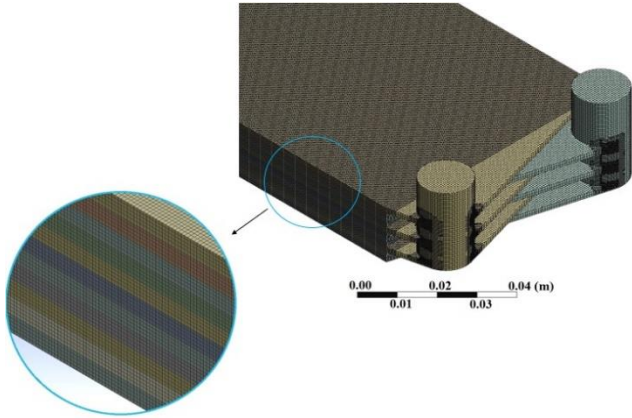


Figure 2. The mesh structure of the brazed plate heat exchanger used in the numerical calculations

In the numerical calculations, ANSYS-Fluent software package was used. In the numerical calculations, second order discretization method was used for convection terms and SIMPLE algorithm was chosen for pressure-velocity coupling. The numerical calculations were performed with steady-state conditions. The convergence is assumed when the normalized residuals of the flow equations are less than 10^{-3} and the energy equation is less than 10^{-6} . The equation for conservation of mass can be written in Equation 1. Fluent software package solves continuum, energy and transport equations numerically and the equation for conservation of mass can be written in Equation 1.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

Conservation of momentum and energy equations are given in Equations 2-3.

$$\nabla \cdot ((\rho V) V) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{T}) + \rho g + F \tag{2}$$

$$\nabla \cdot (V(\rho E + p)) = \nabla \left[k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j I_j + (\bar{T}_{eff} \cdot V) \right] + S_h \tag{3}$$

In these equations p is the static pressure, T is the stress tensor, g is the gravitational acceleration, ρ is the density and F can be given by the user of the term referring to other sources, E is unit of energy, $k_{eff} \nabla T$ is transmission, $\sum_j h_j I_j$ is diffusion and $\bar{T}_{eff} \cdot V$ is viscous energy loss [4]. In the CFD model, three different computational domains named hot fluid zone, solid plates, and cold fluid zone were modeled that heat transfer occurred through these plates and the surfaces of each fluid zone and plates in which contact with the environment were assumed as adiabatic. In the numerical calculations, the mass flow rate ranged from 0.02 kg/s to 0.04 kg/s and hot water inlet temperature values were ranged from 45°C to 60°C, respectively. The boundary conditions used in the numerical study are shown in Table 2.

Table 2. The boundary conditions and solution settings used in the numerical calculations

Supply temperature of hot water	45 - 60 °C
Supply temperature of cold water	10 °C
Mass flow rate (both sides)	0.02 - 0.04 kg/s
Outer surfaces (fluid domains and plates)	Adiabatic conditions
Outlet nozzle (both sides)	Gauge pressure equals to 0 Pa
Simulation conditions	Steady state
Turbulence model	Standard k-ε turbulence model
Solver type	Pressure-based solver
Mesh structure and total elements	Cartesian mesh structure includes six million hexahedral
Pressure-velocity coupling algorithm	SIMPLE
Discretization method	Second order upwind scheme

The Reynolds (Re) number can be calculated by using Equations 4 and 5 to define the flow characteristics inside the heat exchanger [2]. In plate heat exchangers, due to the very small hydraulic diameters, turbulent conditions are observed at very low Re [12]. According to the calculated Re values for both mass flow rates, all the CFD analyses were performed for turbulent flow. The standard k-ε model was chosen for the turbulent modeling and this turbulence model is generally used for such calculations because of its stability and precision [3, 4, 7].

$$Re = \frac{G_{ch} D_e}{\mu} \tag{4}$$

$$G_{ch} = \frac{\dot{m}_{ch}}{N_{cp} b L_w} \tag{5}$$

2.2. Validation of the numerical results

The schematic view of the experimental set-up consists of two different fluid zones which provide hot and cold fluid recirculation is shown in Figure 3.

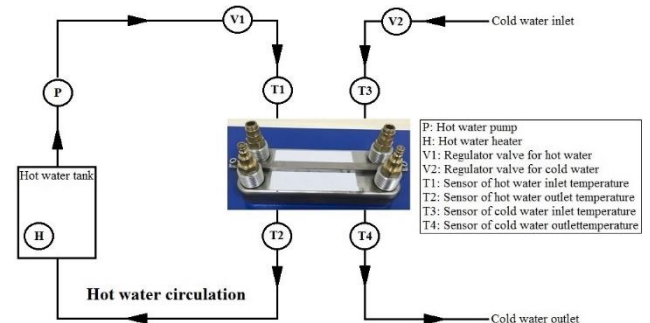


Figure 3. Schematic view of the experimental setup with brazed plate heat exchanger used in this study

In the experiments, we selected four different mass flow rates and inlet temperature values of the hot fluid side considering that the comparative results can be obtained when these type of heat exchangers works with low and high temperature sources. All experiments were performed until the steady state conditions were nearly achieved. Selected test conditions for all experiments were listed in Table 3 and the values of the mass flow rate of hot and cold water sides were set equal for each experiment and this value was ranged from 0.02 kg/s to 0.04 kg/s. The inlet temperature value of the cold water side was kept constant at 10°C during all experiments. On the other hand, the inlet temperature value of the hot water side increased gradually and changed between 45°C and 60°C considering low and high temperature sources.

Table 3. The performed experimental conditions in this study

Cases	Mass flow rate (both sides) (kg/s)	Inlet temp. values of hot water (°C)
Case 1	0.02	45
Case 2	0.04	45
Case 3	0.02	60
Case 4	0.04	60

2.3. Theoretical Calculations

In theoretical calculations, the total heat transfer rate and the total heat transfer coefficient can be calculated for brazed plate heat exchangers by using the LMTD method. In this method, the total heat transfer rate can be calculated by using Equation 6, where \dot{m}_h (kg/s) is the mass flow rate, $c_{p,h}$ (kJ/kgK) is the specific heat and the $T_{h,i}$ and $T_{h,o}$ are the inlet and outlet temperature values of the hot fluid, respectively. The total heat transfer rate can also be calculated from Equation 7 for the cold side, where \dot{m}_c (kg/s) is the mass flow rate, $c_{p,c}$ (kJ/kgK) is the specific heat and the $T_{c,i}$ and $T_{c,o}$ are the inlet and outlet temperature values of the cold fluid, respectively. The total heat transfer rate can be rewritten as stated in Equation 8, where U (W/m²K) is the total heat transfer coefficient, A (m²) is the total heat transfer area and the ΔT_{lm} is the logarithmic mean temperature difference which can be calculated from Equation 11, where ΔT_1 and ΔT_2 are the temperature differences described in Equations 9-10 considering flow direction. Thus, the total heat transfer coefficient can be determined from Equation 8 [2].

$$Q_h = (\dot{m} \cdot c_p)_h \cdot (T_{h,i} - T_{h,o}) \tag{6}$$

$$Q_c = (\dot{m} \cdot c_p)_c \cdot (T_{c,o} - T_{c,i}) \tag{7}$$

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \tag{8}$$

For parallel flow; $\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,i}$ $\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,o}$ $\tag{9}$

For counter flow; $\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o}$ $\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$ $\tag{10}$

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \tag{11}$$

The heat exchanger effectiveness allows for getting comparative results. This can be calculated and written as follows in Equations 12 and 13 [2].

$$C_h = (\dot{m}c_p)_h \qquad C_c = (\dot{m}c_p)_c \tag{12}$$

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{C_h(T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} = \frac{C_c(T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \tag{13}$$

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The measured and calculated hot water side temperature data for the outlet section of the heat exchangers are shown in Table 4. The calculated temperature differences between inlet and outlet temperature values of hot side water are shown in Figure 4. According to these results, we can easily say that higher temperature values were obtained from parallel flow conditions compared to the counter ones for both experimental and numerical results. In general, higher temperature difference values were measured in cases that had low mass flow rates and counter flow for both experimental and numerical studies.

The maximum temperature difference was obtained for experimental study was for Case 3 for counter flow condition and its value was about 23°C in Case 3 for counter flow condition. Another important result is that the temperature values obtained from experimental and numerical studies were slightly different, but they had the same trends. In addition, for the all hot water outlet temperature values of both studies, the temperature values for parallel flow were calculated higher than the values of counter flow.

Table 4. Measured and calculated outlet temperature values of hot fluid sides for both parallel and counter flow (°C)

Cases	Experimental results		Numerical results	
	Parallel flow	Counter flow	Parallel flow	Counter flow
Case 1	32.2	29.6	31.86	30.21
Case 2	33.0	31.7	34.20	33.86
Case 3	40.9	36.9	40.17	37.92
Case 4	41.9	41.4	43.19	42.72

The calculated total heat transfer rate and the total heat transfer coefficient by using experimental data were shown in Table 5. From these results, when the inlet temperature value of the hot fluid side was 45°C, which was acceptable for low temperature source, the maximum calculated total heat transfer rate for counter flow conditions was about 1.9 kW for both experimental and numerical studies. When the inlet temperature value of hot fluid side was 60°C, which was accepted for high temperature source, the maximum calculated total heat transfer rate was nearly about 3.1 kW for experimental study, however, this value was about 2.9 kW for numerical study. The main reason for this difference is that the decrease in total effective heat transfer area due to simplifying the geometrical shape of plate which were selected as rectangular.

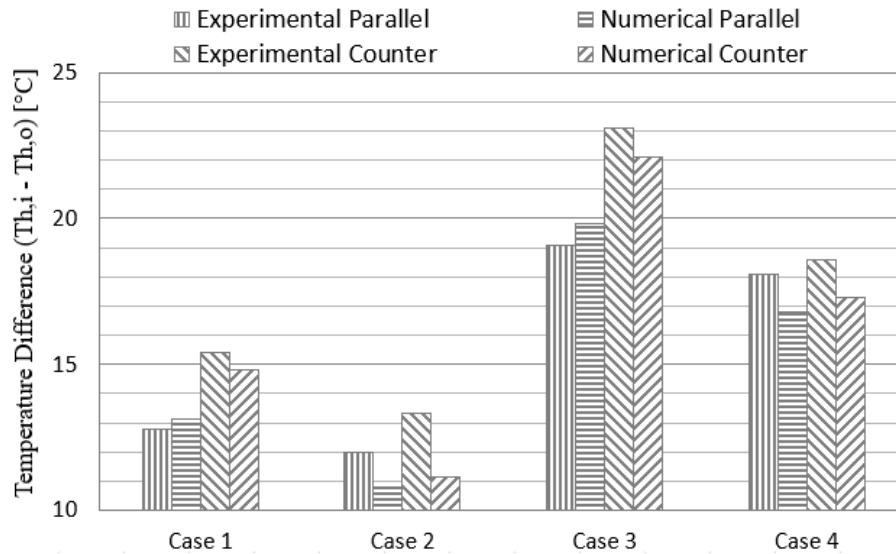


Figure 4. The calculated temperature difference values obtained from experimental and numerical study

Table 5. Calculated total heat transfer rate and total heat transfer coefficient values for both parallel and counter flow cases

Cases	Total heat transfer rate (W)					
	Exp. Results			Num. Results		
	Parallel flow	Counter flow	Diff. in Percent. (%)	Parallel flow	Counter flow	Diff. in Percent. (%)
Case 1	1069.66	1286.82	32.80	1098.28	1235.66	12.51
Case 2	2005.65	2222.86	10.83	1804.41	1862.09	3.20
Case 3	1597.31	1931.46	20.92	1657.96	1846.41	11.37
Case 4	3027.51	3111.07	2.76	2811.27	2891.01	2.84

Cases	Total heat transfer coefficient (W/m ² K)					
	Exp. Results			Num. Results		
	Parallel flow	Counter flow	Diff. in Percent. (%)	Parallel flow	Counter flow	Diff. in Percent. (%)
Case 1	1207.49	1474.50	22.11	1237.45	1301.11	5.14
Case 2	2095.01	2290.29	9.32	1681.45	1636.14	-2.69
Case 3	1349.01	1630.31	20.85	1323.65	1363.57	3.02
Case 4	2398.91	2296.72	-4.26	1846.14	1785.37	-3.29

From the comparison of the measured data for Case 2 and Case 4, when the hot water inlet temperature value was increased from 45°C to 60°C, the total heat transfer rate increased about 1.5 times in both parallel and counter flow conditions. The maximum enhancements in the total heat transfer rate were calculated by about 32.8% and 12.5% in the experimental and numerical study, respectively by changing the flow direction. According to the comparison of the total heat transfer coefficient values in Table 5, the maximum value was calculated about 2400 W/m²K in the experimental study at high temperature heat source (60°C) with parallel flow conditions. The maximum total heat

transfer coefficient value of the numerical study was approximately 1900 W/m²K at high temperature heat source with parallel flow conditions, too. Calculated total heat transfer rates and the total heat transfer coefficients for different temperature values, mass flow rates and the flow directions for both experimental and numerical studies were shown in Figure 5 and Figure 6, respectively. In Figure 5, it can be easily seen that the total heat transfer rate of both studies increased with the increasingly hot water inlet temperature values at all mass flow rates.

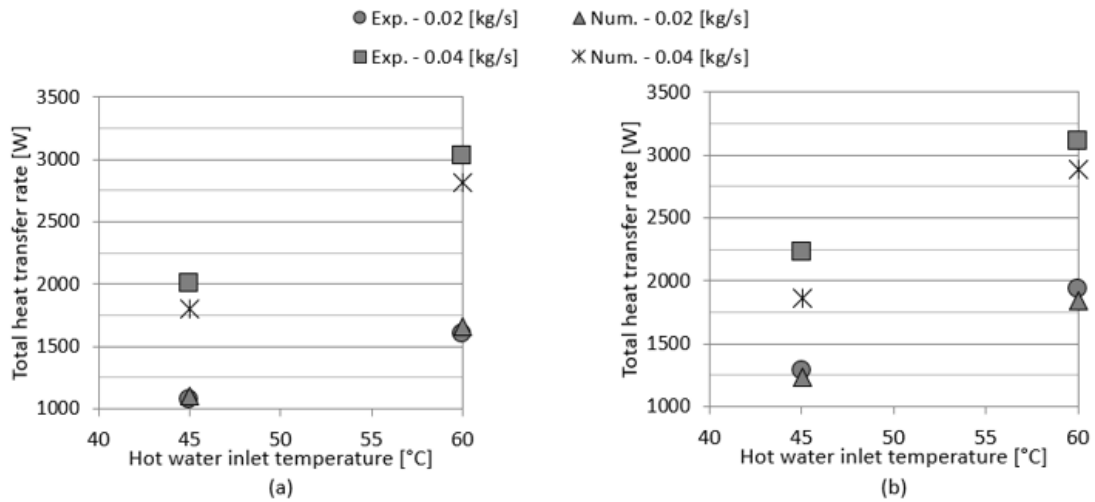


Figure 5. Calculated total heat transfer rate values for (a) parallel (b) counter flow conditions

According to results shown in Figure 6, the total heat transfer coefficients of both studies increased with increasing hot water inlet temperature values, too. However, these values

were nearly the same in Case 4 under counter flow conditions.

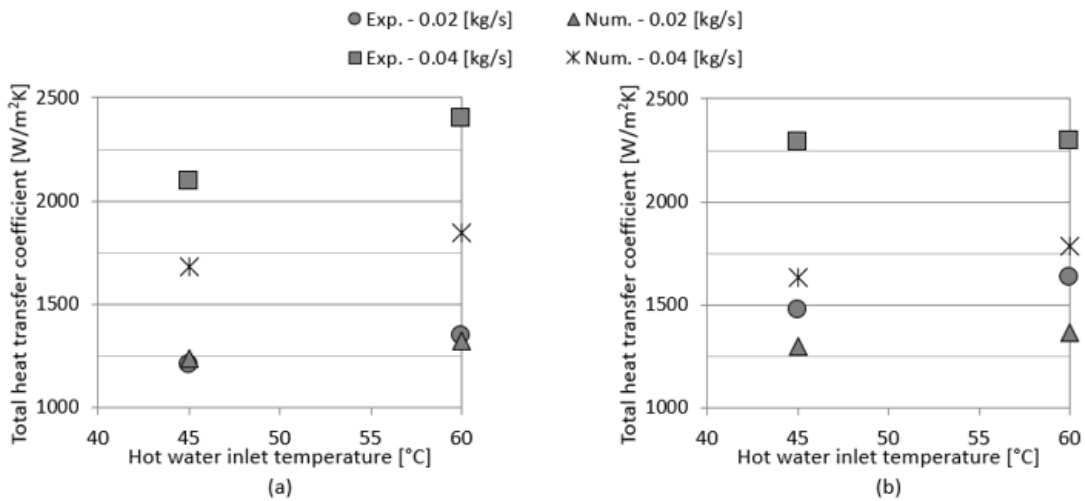


Figure 6. Calculated total heat transfer coefficient values for (a) parallel (b) counter flow conditions

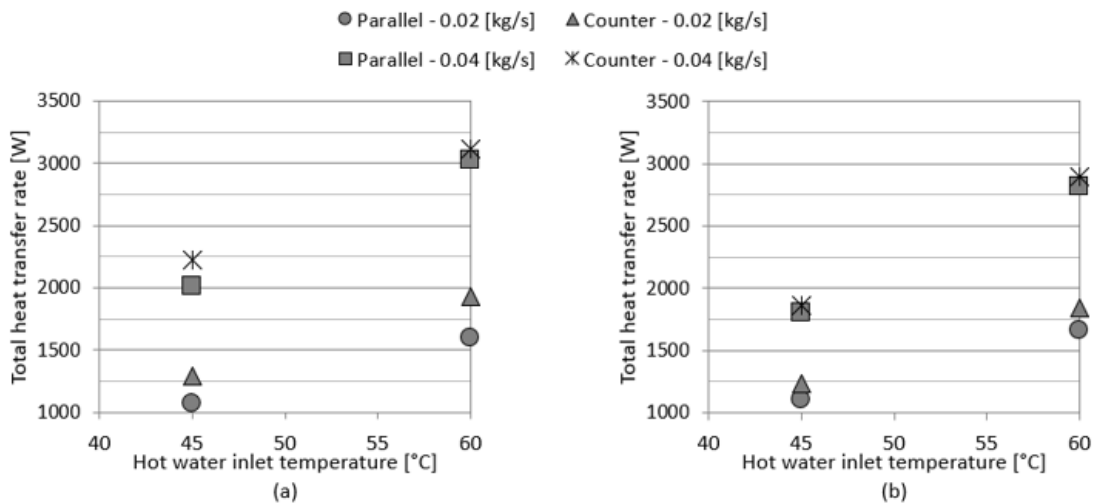


Figure 7. Comparison of calculated total heat transfer rate values of (a) experimental and (b) numerical studies under parallel and counter flow conditions

The effect of changing the flow direction on the total heat transfer rate of both experimental and numerical studies can be seen in Figure 7. According to the results, in the experimental study, the total heat transfer rate values of parallel and counter flow conditions at 60°C with a high mass flow rate (0.04 kg/s) were nearly equal. At all the hot water inlet temperatures, the calculated values of the total heat transfer rate for counter flow directions were higher than the calculated parallel ones under the same mass flow rates. The calculated total heat transfer rate and the total heat transfer coefficient were compared to the experimental data in Table 6. The total heat transfer rate and the total heat transfer coefficient values were calculated by using Equation 6 and these values were about 1085 W and 1225 W/m²K, respectively, for the hot side and these calculated values were close to 1070 W and 1200 W/m²K obtained from experimental results for Case 1 under parallel flow condition. The difference in the percentage of total heat transfer rate and total heat transfer coefficient obtained from numerical and experimental results was about 2.7% and 2.5%, respectively. From these results, we can easily say that the CFD tool can be useful for the prediction of the total heat transfer coefficient and the total heat transfer rate of the brazed plate of heat exchanger. The heat exchanger effectiveness values for all cases of the experimental study were calculated by using Equations 12 and 13 and the distribution values were shown in Figure 8. It can be easily seen that the counter flow conditions had better effectiveness

values than parallel flow conditions for all cases. The predicted temperature data at the middle section plane of each fluid zone are shown in Figure 9 and 10. The predicted temperature values for the section planes of the cold side were ranged from 10°C to 27°C in general and these values were computed between 27°C and 45°C for the hot side.

Table 6. The calculated total heat transfer rate and total heat transfer coefficient for both sides and comparison to the experimental for Case 1

	Q (W)	U (W/m ² K)
Experimental data	1069.66	1207.49
Numerical results	1098.28	1237.45

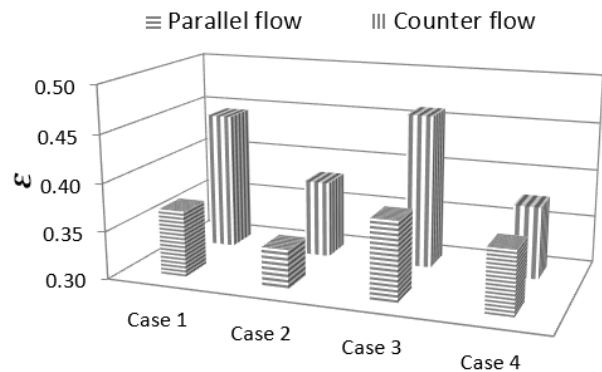


Figure 8. Effectiveness values of all cases calculated from experimental data

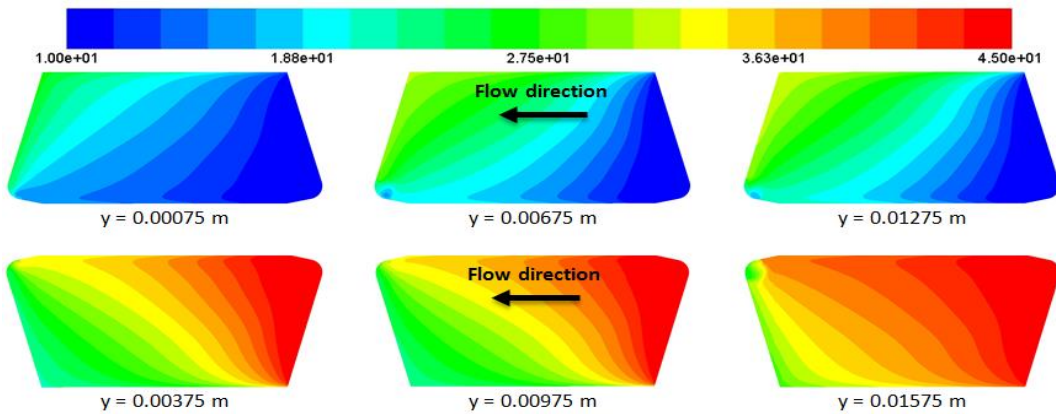


Figure 9. Predicted temperature distribution at the middle section plane of each channel for Case 1 and parallel flow conditions

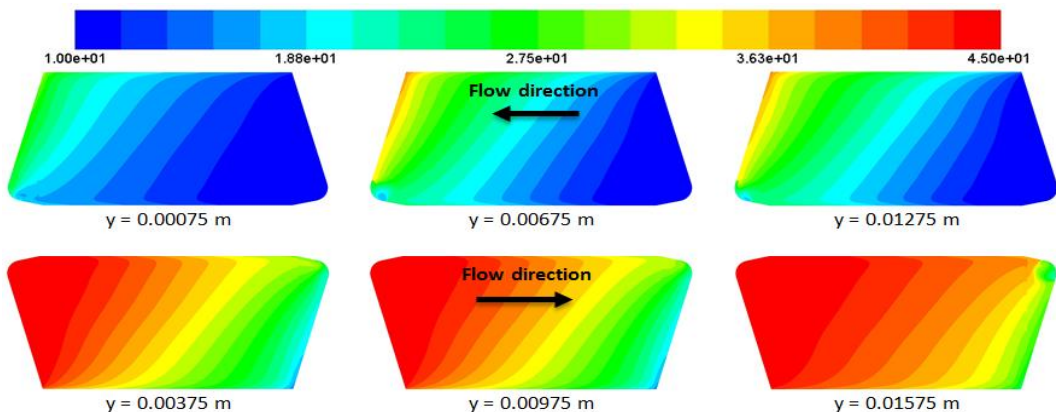


Figure 10. Predicted temperature distribution at the middle section plane of each channel for Case 1 and counter flow conditions

4. CONCLUSIONS

In this paper, the heat transfer characteristics of a brazed plate heat exchanger that used in many engineering applications due to its compact structure were performed numerically by using a three-dimensional CFD model. We also employed an experimental study for getting comparative results by changing the main parameters such as the mass flow rate, flow direction, and the inlet temperature value of hot water. These parameters were selected accordingly for getting the thermal performance of the heat exchanger by using lower and higher temperature sources. The theoretical calculations about the total heat transfer rate and the total heat transfer coefficient were achieved by using the LMTD method. Consequently, the main results of this study are listed below.

- The counter flow effects can easily be noticed in both experimental and numerical results. The enhancement in the total heat transfer rate was observed by changing the flow direction. The effectiveness results of counter flow conditions were considerably better than parallel ones for all cases.
- The maximum value of the total heat transfer coefficient was calculated about $2400 \text{ W/m}^2\text{K}$ in the experimental study at a high temperature heat source (60°C) with parallel flow conditions. This value was obtained about $2300 \text{ W/m}^2\text{K}$ at high temperature heat source with counter flow conditions. These values were close to each other and this indicates that source temperature had more effect on the total heat transfer coefficient than the flow direction especially at high temperature values.
- When the inlet temperature value of the hot fluid side was selected as a lower temperature source (45°C), the maximum calculated total heat transfer rate for counter flow conditions was obtained about 2 kW by using experimental and numerical data. When the inlet temperature value of the hot fluid side was selected as a higher temperature source (60°C), the maximum calculated total heat transfer rate was obtained about 3 kW by using experimental and numerical data for counter flow conditions. As a result, we can easily say that the increase in hot water inlet temperature values had a great effect on the heat transfer rate.
- Due to the rising mass flow rate from 0.02 kg/s to 0.04 kg/s, the total heat transfer rate was increased by 72% and 61% for low and high temperature sources used in the experimental study, respectively. Considering the increase in percentage for the total heat transfer rate, the mass flow rate had more effects than the other rating parameters such as flow direction and hot water inlet temperature values.
- The difference in percentage values of the total heat transfer rate and total heat transfer coefficient obtained from experimental and numerical data was about 2.7% and 2.5%, respectively. According to the numerical simulation results, the temperature difference calculated for the hot side was close to the experimental results.

Thus, the numerical results were in good agreement with the experimental data used in this study.

In further studies, we will plan to investigate the effects of a wide range of mass flow rate on the heat transfer rate of a brazed plate heat exchanger with using dimensionless parameters through a detailed CFD model.

NOMENCLATURE

A	total heat transfer area	[m ²]
b	mean channel gap	[m]
cp	specific heat at constant pressure	[J/kg K]
C	flow stream heat capacity rate	[W/K]
De	equivalent channel diameter	[m]
ε	heat exchanger effectiveness	-
Gch	channel mass flow rate	[kg/m s]
Lw	plate width inside gasket	[m]
m'	mass flow rate	[kg/s]
Ncp	Number of channel per pass	-
Q	total heat transfer rate	[W]
Re	Reynolds number	-
T	temperature	[°C]
u, v, w	velocity components	[m/s]
U	total heat transfer coefficient	[W/m K]
x, y, z	position coordinates	-
μ	dynamic viscosity	[Pa s]

Subscripts

c	cold water
ch	channel
cp	channel per passes
c,i	cold water inlet
c,o	cold water outlet
h	hot water
h,i	hot water inlet
h,o	hot water outlet
lm	logarithmic mean
max	maximum
min	minimum
w	wall
Δ	delta operator


REFERENCES

- [1].M. M. A. Bhutta, N. Hayat, M. H. Bashir, A. R. Khan, K. N. Ahmad and S. Khan, "CFD applications in various heat exchangers design: A review", Applied Thermal Engineering, vol. 32, no 1, September 2012.
- [2].S. Kakaç, H. Liu, A. Pramuanjaroenkij, Heat exchangers: selection, rating, and thermal design, CRC Press: Florida, 2012.
- [3].O. Ipek, M. Kan and B. Gurel, "Examination of Different Heat Exchangers and the Thermal Activities of Different Designs", Acta Physica Polonica A, vol. 132, no 3, pp. 580-584, 2017.
- [4].M. Kan, O. Ipek and B. Gurel, "Plate heat exchangers as a compact design and optimization of different channel


- angles”, *Acta Physica Polonica A*, vol. 128, no 2-B, pp. B-49-B52, 2015.
- [5].K. Thulukkanam, *Heat Exchanger Design Handbook*, CRC Press, 2013.
- [6].O. F. Genceli, *Isı Değiştiricileri*, Birsen Yayınevi, 2017.
- [7].A. K. Tiwari, P. Ghosh, J. Sarkar, H. Dahiya and J. Parekh, “Numerical investigation of heat transfer and fluid flow in plate heat exchanger using nanofluids”, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 85, pp. 93-103, June 2014.
- [8].V. S. Gullapalli, Ph.D. Thesis, Estimation of Thermal and Hydraulic Characteristics of Compact Brazed Plate Heat Exchangers, Lund University, 2013.
- [9].M. Fernández-Torrijos, J. A. Almendros-Ibáñez, C. Sobrino and D. Santana, “ ϵ -NTU relationships in parallel-series arrangements: Application to plate and tubular heat exchangers”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 99, pp. 1119-1132, February 2016.
- [10]. L. Wang, B. Sundén, R. M. Manglik, *Plate Heat Exchangers*, WIT Press, 2007.
- [11]. H. Bayram and G. Sevilgen, “Numerical Investigation of the Effect of Variable Baffle Spacing on the Thermal Performance of a Shell and Tube Heat Exchanger,” *Energies*, vol. 10, no. 12, p. 1156, August 2017.
- [12]. R. L. Pradhan, D. Ravikumar, D. L. Pradhan, Review of Nusselt Number Correlation for Single Phase Fluid Flow through a Plate Heat Exchanger to Develop C# Code Application Software, 2nd National Conference on "Recent Developments in Mechanical Engineering, Pune, India, 2013.


R22 ve Alternatifleri R438A ile R417A Soğutucu Akışkanları için Kızılötesi Görüntü İşleme Teknikleri Kullanarak, Soğutma Sistem Performansının İncelenmesi


¹Ferzan Katırcıoğlu, ^{*2}Zafer Cingiz, ³Yusuf Çay, ⁴A. Etem Gürel, ⁵Suat Sarıdemir, ⁶Ahmet Kolip


¹D.Ü. Düzce MYO Elekt. ve Otomasyon Böl. Düzce, ferzankatircioglu@duzce.edu.tr 

²D.Ü. Düzce MYO Elektrik ve Enerji Böl. Düzce, zafercingiz@duzce.edu.tr 

³SUBÜ Teknoloji Fak. Makine Müh. Böl. Sakarya, ycay@subu.edu.tr 

⁴D.Ü. Teknoloji Fak. Makine ve İmalat Müh. Böl. Düzce, alietemgurel@duzce.edu.tr 

⁵D.Ü. Tekn. Fak. Makine ve İmalat Müh. Böl. Düzce, suatsaridemir@duzce.edu.tr 

⁶SUBÜ Teknoloji Fak. Makine Müh. Böl. Sakarya, akolip@subu.edu.tr 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 25.04.2020

Kabul Tarihi: 07.07.2020


Öz


Günümüzde çeşitli protokoller ile halojenik kloroflorokarbon (CFC) ve hidrokloroflorokarbon (HCFC) soğutucu akışkanlarının ilerleyen zamanlarda kullanılmayacağı ve bu akışkanlara çeşitli alternatiflerin oluşturulması gerektiği gözlemlenmiştir. Geleneksel soğutma etkinlik katsayısı (COP) hesaplama yönteminde, termodinamik özellik tabloları ve basınç-entalpi diyagramları kullanılmaktadır. Önerilen yöntem sayesinde, COP hesaplanırken, bu tablo ve diyagramların kullanılmasına gerek duyulmayacaktır. Kızılötesi görüntüleme sistemi ile belirtilen bölgelerden görüntü alınması yeterli olacaktır. Bu çalışmada, R22 akışkanına alternatif olan, ozon tabakasına dost R417A ve R438A akışkanlarının ticari soğutma sistemlerine yönelik performans analizi yapılmıştır. CFC gazların tüketiminin yasaklanması ile birlikte gelen süreçte ozon tabakasına zarar veren diğer bir gaz grubu olan HCFC gazların da kullanımı önce sınırlandırılmış ardından tamamen yasaklanmıştır. Bu gazlardan en çok kullanılanı R22 gazıdır. Referans R22 gazı ile R438A ve R417A gazlarının performansları kızılötesi görüntü analizi ile gerçekleştirmek için bölgesel öz nitelik veri elde edinimi ile COP olmak üzere iki yöntem önerilmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen iki ara yüz üzerinde, kızılötesi görüntülerden elde edilen büyüklükler, grafiksel ve sayısal olarak karşılaştırılmaktadır. Elde edilen sayısal ve görsel uygulama sonuçlarına göre, R22 gazına en yakın performansı R438A göstermiştir. Geleneksel hesaplamalı performans testlerine göre, uygulanan sistemin kullanım kolaylığı, uzaktan ölçüm ve eş zamanlı kayıt alma noktasında daha avantajlı olduğunu göstermiştir.


Anahtar Kelimeler: Kızılötesi görüntü işleme, COP, soğutucu akışkan


Investigation of refrigeration system performance using infrared image processing techniques for R22 and its alternatives, R438A and R417A refrigerants.

¹Ferzan Katırcıoğlu, ^{*2}Zafer Cingiz, ³Yusuf Çay, ⁴A. Etem Gürel, ⁵Suat Sarıdemir, ⁶Ahmet Kolip

¹D.Ü. Düzce MYO Elekt. ve Otomasyon Böl. Düzce, ferzankatircioglu@duzce.edu.tr, 

²D.Ü. Düzce MYO Elektrik ve Enerji Böl. Düzce, zafercingiz@duzce.edu.tr, 

³SUBÜ Teknoloji Fak. Makine Müh. Böl. Sakarya, ycay@subu.edu.tr, 

⁴D.Ü. Teknoloji Fak. Makine ve İmalat Müh. Böl. Düzce, alietemgurel@duzce.edu.tr, 

⁵D.Ü. Tekn. Fak. Makine ve İmalat Müh. Böl. Düzce, suatsaridemir@duzce.edu.tr, 

⁶SUBÜ Teknoloji Fak. Makine Müh. Böl. Sakarya, akolip@subu.edu.tr, 

Abstract

Today, it has been observed that with various protocols, halogenic chlorofluorocarbon (CFC) and hydrochlorofluorocarbon (HCFC) refrigerants will not be used in the future and various alternatives must be created. In the conventional cooling efficiency coefficient (COP) calculation method, thermodynamic property tables and pressure-enthalpy diagrams are used. Thanks to the

*Sorumlu yazar: Elektrik ve Enerji Bölümü, Düzce Meslek Yüksek Okulu, Düzce Üniversitesi, 81010 Düzce, Turkey. zafercingiz@duzce.edu.tr, +90380 524 00 98.

proposed method, it will not be necessary to use these tables and diagrams when calculating the COP. It will be sufficient to take images from the regions indicated by the infrared imaging system. In this study, performance analysis of commercial refrigeration systems of R417A and R438A fluids that are alternative to R22 fluid, which are friendly to the ozone layer, has been performed. With the prohibition of the consumption of CFC gases, the use of HCFC gases, another gas group that damages the ozone layer, has been restricted and then banned. The most used of these gases is R22 gas. In order to perform the performances of reference R22 gas and R438A and R417A gases with infrared image analysis, two methods are proposed: COP with regional feature data acquisition and COP. In addition, on the two interfaces realized, the sizes obtained from infrared images are compared graphically and numerically. According to the obtained numerical and visual application results, R438A showed the closest performance to R22 gas. Compared to traditional computational performance tests, the ease of use of the system has shown that it is more advantageous in terms of remote measurement and simultaneous recording.

Keywords: Infrared image processing, COP, refrigerant

1. GİRİŞ

Mevcut çalışmalar soğutucu akışkanların performanslarını termodinamiğin birinci ve ikinci yasası çerçevesinde incelemekte ve buna göre performans değerlendirmesi sunmaktadır. Soğutma insanoglu için vazgeçilmez ihtiyaçtır. Çünkü soğutma gıdaların korunmasında, her türlü konfor sistemlerinde (konutlar, taşıtlar, iş yerleri vb.), sanayide, sağlık sektöründe kısacası birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Soğutma sistemleri, özellikle endüstride kullanılanları gittikçe önem kazanmaktadır. Refah seviyesinin yükselmesiyle birlikte tüketim maddelerinde aranan kaliteyi de, beraberinde getirmektedir. Özellikle gıda maddelerinin ilk üretildiğindeki tazeliğini ve özelliklerini koruyabilmesi ancak uygun sıcaklık ve nem ortamı oluşturularak saklanabilmesiyle sağlanabilir. Literatür incelendiğinde, R22 ve alternatifleri olan R417A ve R438A soğutucu akışkanları için deneysel ve teorik çalışmaların olduğu, genelde performans ile verimlilik üzerine yoğunlaşmış olduğu görülmektedir. Allgood ve diğ., yaptıkları çalışmada, mevcut soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde R438A'yı denemiş ve R22'ye kıyasla benzer soğutma performansı ve enerji verimliliğinin elde edildiğini bildirmiştir. Yenileme sırasında yağ değişiminde herhangi bir değişiklik olmadan düşük deşarj sıcaklığı, benzeri evaporatör ve kondenser basıncı gözlenmiştir [1]. Baraz, yaptığı çalışmada doğrudan genleşmeli sistemlerde alternatif soğutucu akışkanlar kullanmıştır. R22 alternatiflerinden R422D ve R417A soğutucu akışkanları teorik ve deneysel kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır [2]. BOCK Kompresörleri, kompresörlerinde R422D (MO29), R417A (MO59) ve R438A (MO99) değerlerini test etmişler ve üç alternatif soğutucu arasında sıkıştırma sıcaklığının R417A için en düşük olduğunu bulmuşlardır; R438A en yüksek soğutma kapasitesine sahipken R417A, R22'ye kıyasla en yüksek enerji verimliliğine sahip olduğu görülmüştür [3]. Ergün ve diğ., yaptıkları çalışmada, özellikle soğuk depoculukta ve iklimlendirme sistemlerinde oldukça yaygın olarak kullanılan R-22 soğutucu akışkanına alternatif olarak piyasaya sürülen ve ozon tabakasına dost olan, iki soğutucu akışkan R-417A ve R-438A termodinamik açıdan incelenmiştir. Yapılan çalışmada, R-22, R-417A ve R-438A soğutucu akışkanlarının performansları karşılaştırılmıştır. Farklı evaporasyon sıcaklıkları için, soğutucu akışkanların performansları termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu kullanılarak değerlendirilmiştir ve

sistemlere ait performans katsayıları hesaplanmıştır. Sonuç olarak incelenen 3 akışkan için R22 akışkanına en iyi alternatifin R438A olduğu tespit edilmiştir [4]. La Rocca ve diğ., yaptıkları çalışmada, R413A, R417A, R422A ve R422D'nin R22'nin yerini alması için düşük sıcaklıklı bir soğutma ünitesinde incelemiş, düşük enerji verimliliği ve daha yüksek enerji tüketimi gösteren tüm alternatif akışkanlar için COP'un daha düşük olduğunu bildirmiştir. [5]. Cingiz ve diğ., yaptıkları çalışmada, soğutma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan R22 soğutucu akışkanına alternatif ve ozon tabakasına dost R417A, R438A, R422A ve R422D soğutucu akışkanlarının performansları termodinamiğin birinci ve ikinci yasasına göre incelenmiştir. Çalışmanın sonunda, R22 soğutucu akışkanına alternatif olarak geliştirilen R417A, R438A, R422A ve R422D akışkanlarından, R438A akışkanının daha yüksek COP değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir [6]. Termal kamera ile yapılan çalışmalar, genelde yalıtım uygulamaları ve enerji tüketiminin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Görüntü işleme tekniği gelişmiş ülkelerde uzun yıllardır kullanılmakta olup, uzay araştırmaları, tıp alanında çeşitli hastalıkların tespit edilmesi, tarım ve gıda mühendisliği alanında ürün kalitesinin, makine ve inşaat mühendisliği alanında çeşitli mekanik ve beton malzemelerin özelliklerinin, korozyonlarının belirlenmesinde, ayrıca kalite kontrol alanında yararlanılmıştır. Termal kamera ile görüntü işleme tekniğinin soğutucu akışkan ile sistem performanslarının belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalara literatürde rastlanılmamıştır. Görüntü işleme yöntemiyle performans tespiti her ne kadar R22, R417A ve R438A üzerinde gerçekleştirilse de yöntemin uygulama sınırları belirlenip farklı soğutucu akışkan grupları içinde kullanımı genişletilecektir. Çalışan ve diğ., termal kamera görüntülerini, ekipmanların ve cihazların arızalarının giderilmesi, bakımları gibi fonksiyonları icra etmek için kullanmışlardır. Tesisin bakım ve plansız oluşan aksaklıklarına bağlı maliyetler termografi maliyetinden daha pahalı olmaktadır [7]. Weinmann ve diğ., yaptıkları çalışmada, borulardaki ve binalardaki izolasyon kusurlarını belirlemede termal görüntüleri kullanmışlardır. Yapacağımız çalışmada soğutma sistemindeki arızalar, bakım periyotları ve borulardaki izolasyon eksiklikleri ve hatları da rahatlıkla belirlenebilecektir [8]. Katırcıoğlu ve diğ., sunduğu çalışmada, soğutma sistemlerinde termal görüntü analizi ile farklı soğutucu akışkanların uzaktan

sensörsüz olarak performanslarının karşılaştırılması için, elde edilen termal görüntülerin iyileştirilmesi önerilmiştir [9].

Gerçekleştirilen bu çalışmanın özgün değeri; ticari tip soğutma sistemlerinde, sistem üzerinden alınacak ölçüm değerleri (sıcaklık, basınç vb.) yerine kızılötesi görüntü analizi işleme tekniği kullanılarak farklı soğutucu akışkanların COP değerinin belirlenmesidir. Çalışmada, R22 soğutucu akışkanının alternatifleri, kızılötesi görüntü işleme tekniği açısından incelenmiştir. R22'ye ek olarak R417A ve R438A soğutucu akışkanları ele alınarak, kurulmuş olan soğutma sisteminde yapılan deneyler ve alınan veriler incelenip hesaplamalar yapılmış, buna ek olarak ticari tip soğutma sisteminde kızılötesi görüntüleme analizi hususu da incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar soğutma etkinlik katsayısı (COP) performansı açısından değerlendirilmiştir. Bu çalışma ile ticari tip soğutucular ve endüstriyel tip soğutma sistemleri için performans iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Oluşturulacak olan kullanıcı ara yüzü bu alanda çalışacak teknik elemanların kullanımına uygun, basit ve kolay algılanabilir şekilde tasarlanacaktır. Bu sayede, yöntemin yaygınlaştırılması hedeflenmektedir. Başarı durumunda, endüstriyel soğutma sistemlerinde kızılötesi görüntüleme analizinin ele alınması ile teknolojik önemi olan sonuçlar elde edilmesi beklenmektedir. Kızılötesi görüntü verilerinin farklı bir algılama elemanı olarak kullanılması önemli bir yeniliktir. Soğutma sistemini hızlı ve kolay bir yolla izleme kolaylığı getirecektir. Bağlantı olmaksızın termal kamera ve bir bilgisayar, sistemin performansını test etmek için yeterli olacaktır. Uzaktan algılama sayesinde, sisteme yaklaşım açısından iş güvenliğini yükseltme ve kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Mevcut araştırmamızda, Bölüm 3.1.'de; öznetelik çıkartım yöntemi ile soğutma sistem performansı belirlenmesi, Bölüm 3.2'de COP yöntemi ile soğutma sistem performansının belirlenmesi, Bölüm 4.'de ise deneysel sonuçların değerlendirilmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

2. R22, R438A ve R417A GAZLARI İLE SOĞUTMA SİSTEMİNİN KURULUMU

2.1. Kullanılan gazların genel özellikleri

CFC gazların tüketiminin yasaklanması ile birlikte gelinecek noktada ozon tabakasına zarar veren diğer bir gaz grubu olan HCFC gazların da kullanımı önce sınırlandırılmış ardından tamamen yasaklanmıştır. Bu gazlardan en çok kullanılanı R22 gazıdır. R22 gazının alternatifi olarak çeşitli gazlar kullanılmıştır. En sık kullanılanları R404A, R407c ve R410A gazlarıdır. Ancak bu gazların mevcut sistemlerde kullanılmasında bazı problemlerle karşılaşmaktadır. R22 yerine bu gazlardan herhangi birinin sisteme alınabilmesi için sistem boru hatlarında ve ekipmanlarında değişiklikler yapılması gerekmektedir. Bu durum, uygulamada önemli güçlükler çıkarmaktadır. Bu güçlükleri aşabilmek amacı ile iki yeni alternatif HFC grubu gaz olan R417A ve R438A soğutucu akışkanları piyasaya sürülmüştür. Bu soğutucu akışkanların ön önemli avantajı; sistem boyutlandırmasında

herhangi bir değişikliğe gerek kalmaması ve sadece kurutucu-filtre değişimi ile sisteme uyum sağlayabilmesidir. R417A ve R438A akışkanları HFC karışımlarıdır. Bünyesindeki akışkanların kütleli miktarları ve ozon yok etme potansiyeli (ODP), küresel ısınma potansiyeline (GWP) değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de görüldüğü üzere, R417A ve R438A akışkanlarının ozon tüketim değerleri olmamasına rağmen, küresel ısınma potansiyelleri bulunmaktadır. R22 soğutucu akışkanın GWP değeri alternatifi olan akışkanlardan daha düşüktür. Ancak ODP değerlerinin sıfır olması sebebiyle orta vadede R22 ile çalışan sistemlerde kullanılmasının uygun olacağı düşünülebilir.

Tablo 1. Soğutucu Akışkanların Özellikleri (Properties of Refrigerants) [6]

Soğutucu Akışkan	Moleküler Ağırlık (kg/kmol)	Kritik Sıcaklık (°C)	Kaynama Noktası (°C)	ODP	GWP
R22 Bileşim Saf	86.5	96.2	-40.8	0.05	1810
R417A Bileşim R125 (% 46.6) R134a (% 50) R600 (% 3.4)	106.8	87.1	-39.1	0	2346
R438A Bileşim R125 (% 45) R134a (% 44.2) R600 (% 1.7) R601a (% 0.6) R32 (% 8.5)	99.1	85.3	-42.3	0	2264

İçerdiği klor atomları sebebiyle R22, ozon tabakasının tükenmesine yol açmaktadır. Bu yüzden R22 ile çalışan sistemler, uzun vadede (ODP) değeri sıfır olan düşük (GWP) sahip soğutucu akışkanlarla değiştirilmelidirler. Yüksek GWP, yüksek çevresel etki demektir. Sonuç olarak düşük GWP soğutucularının benimsenmesi toplam çevresel etkilerin azaltılması açısından etkili bir çözüm olduğu sonucuna varılmıştır [6]. R417A, R125, R134a ve R600'ün kullanımı kolay, ozon tüketmeyen bir HFC güçlendirme soğutucu karışımıdır. Tipik olarak, direkt genişlemeli sabit iklimlendirme ve orta sıcaklıkta soğutma sistemlerinde R22'nin yerine kullanılır. R417A, kompresörün ömrünü uzatabilen R22'den önemli ölçüde daha düşük deşarj sıcaklığına sahiptir. Çoğu sistemde bu ürün gerekli soğutma kapasitesini ve enerji tasarrufu sağlar, ancak bazı sistemler daha düşük kapasitede çalışabilir. Bu soğutucu, hızlı, kolay ve uygun maliyetli iyileştirmeler sağlayan geleneksel ve yeni yağlayıcılarla uyumludur ve tüm soğutucu şarjını çıkarmadan servis sırasında doldurulabilir. R417A bir karışım olduğu için, sistemi şarj ederken, daima bir sıvı olarak silindirden çıkarılmalıdır. Klima ve küçük ticari soğutma uygulamaları için uygun olup MO/AB/POE yağları

ile uyumludur [10]. R438A, kullanımı kolay, ozona zarar vermeyen HFC soğutucu akışkan karışımıdır. Performans, kapasite, kütle akışı ve basınç karakteristiklerine açısından tüm klima ve chiller uygulamaları için R22'nin yerine alternatif olarak kullanılmak için uygundur. Genleşme valfinin sabit bir deliğe sahip olduğu veya sistemin kapasitesine çok yakın olduğu R422D'ye göre avantajları vardır, R417A'ya göre daha iyi kapasiteye sahiptir. Bu ürün, geleneksel ve yeni yağlayıcılarla uyumludur, hızlı, kolay ve uygun maliyetli bir iyileştirme sağlar ve servis sırasında tüm soğutucu şarjını çıkarmadan tamamlanabilir. R438A bir karışım olduğu için, sistemi şarj ederken daima bir sıvı olarak silindirden çıkarılmalıdır. Ticari klima, ısı pompaları, doğrudan genleşmeli (DX) soğutma sistemleri için uygun olup, MO/AB/POE yağları ile uyumludur [10]. Özellikle R22 ve alternatifleri olarak ele alınan soğutucu akışkanlar düşük sıcaklık uygulamalarındaki ticari tip soğutma sistemleri için uygundur.

2.2. Soğutma sistemi deney seti kurulumu

Deney setine ilişkin genel görünüş **Şekil 1**'de verilmiştir. Üç soğutucu akışkanın enerji değerlendirmesi için kullanılan deneysel sistem, başlangıçta R22 ile çalışmak üzere tasarlanmış buhar sıkıştırma soğutma çevrimidir. Tasarlanan deneysel sistemde, R22, R417A ve R438A soğutucu akışkanları kullanılmıştır. Deney sisteminde hermetik pistonlu tip kompresör, hava soğutmalı evaporatör ve kondenser, dıştan dengelemeli termostatik genleşme vanası kullanılmış olup, evaporatör yalıtımlı ve sabit hacimli bir kabin içerisine konulmuştur. Test edilen her soğutucu gaz öncelikle sistem vakum edilerek elektronik terazi kullanılarak 900 g miktarında gaz şarjı yapılmıştır. Deneylerin stabil ve sağlıklı bir ortamda gerçekleştirilebilmesi, farklı gazların performanslarının daha gerçekçi şekilde incelenebilmesi için sistem kapalı bir ortamda, dış sıcaklık sabit olacak bir şekilde imal edilmiştir. Tiç: 22 °C (iç-ortam sıcaklığı) olarak kabul edilmiştir. Soğutma sisteminden kızılötesi görüntülerin alınma prosesi **Şekil 2**'de gösterilmiştir. Önerilen yöntemde kullanılacak bölgeler, numaralandırılmış ve bölge isimleri de yine şekil üzerinde verilmiştir. **Tablo 2**'de kullanılan soğutma sistem bileşenleri ve özellikleri verilmiştir. Her soğutucu akışkan ile sistem çalışırken termal kamera ile görüntüler, sistem bir saat çalışarak kararlı hale geldikten sonra alınmıştır. Daha sonra verisi alınan soğutucu akışkan sistemden boşaltılıp, sistem vakumlandıktan sonra diğer soğutucu akışkan basılmıştır.

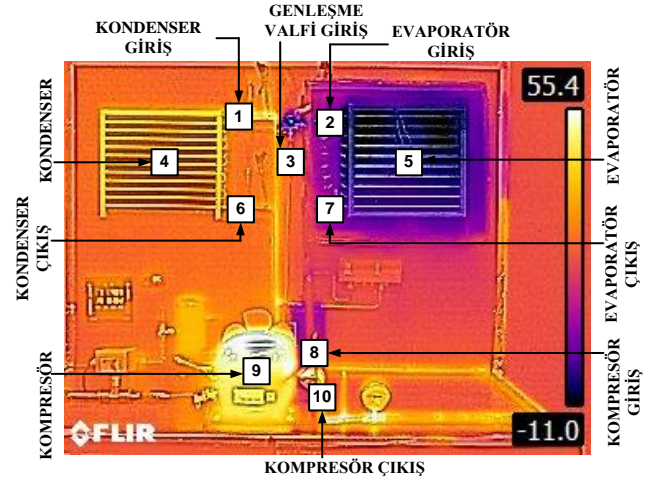
Tablo 2. Soğutma sisteminin bileşenleri ve özellikleri

Malzemenin adı	Özellği
Hermetik kompresör	Embraco NEU 6215 GK Güç: 1/2 HP
Kondenser hava akışlı	Karyer KT 3/4 HP
Evaporatör hava akışlı	Karyer KT 3/4 HP
Genleşme vanası	Dunan TGV, PS 46 bar Çalışma aralığı: -40/+10 °C
Termal kamera	Flir E8-XT 320x240 (76800 piksel) -20 °C – 550 °C
Soğutucu akışkan	R22, R438A, R417A

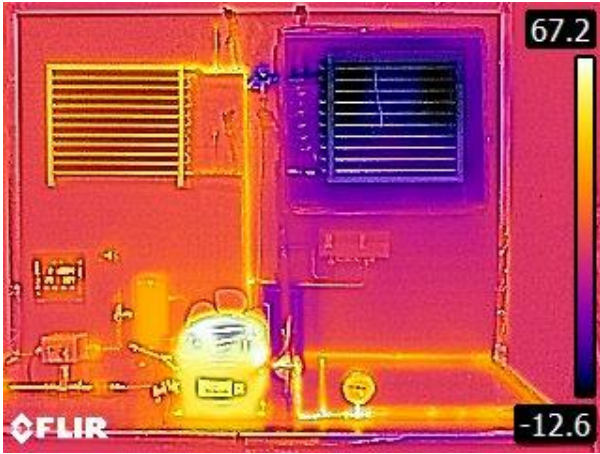


Şekil 1. Soğutma sistemi deney seti

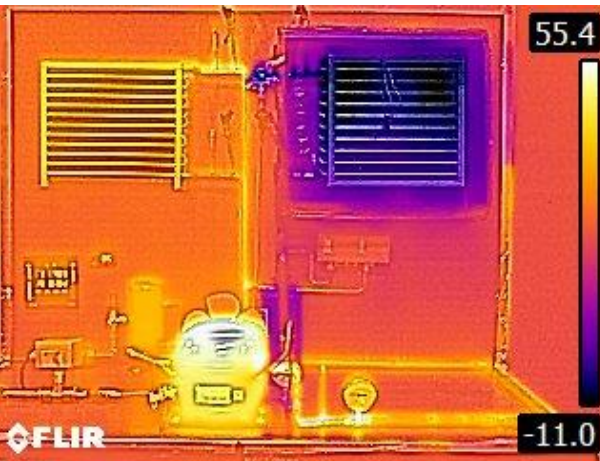
Deney sisteminden R22, R438A ve R417A soğutucu akışkanları için alınan infrared görüntüler **Şekil 3. a, b ve c'** de görülmektedir. Sistemin şematik gösterimi **Şekil 4**'de verilmiştir. Çalışılan akışkanların performanslarını değerlendirebilmek için, sistemin her ana eleman giriş ve çıkışları (kompresörün giriş-çıkışı, kondenser giriş-çıkışı, termostatik genleşme valfi girişi, evaporatör giriş-çıkışı) ile kompresör, kondenser ve evaporatör yüzeyindeki sıcaklıklar, sistem üzerinde belirtilen noktalardan termal kamera ile elde edilerek karşılaştırılmıştır.



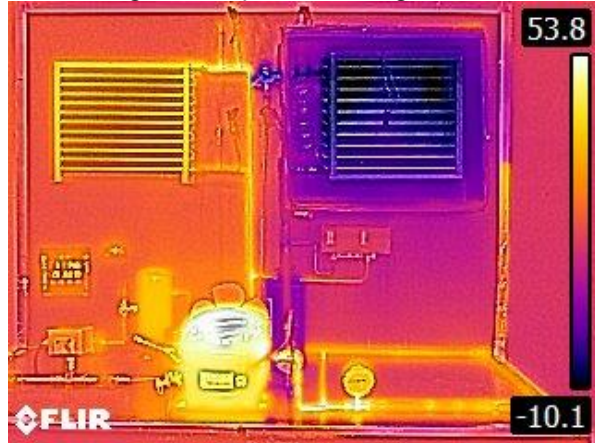
Şekil 2. Soğutma sistemi üzerinden infrared (kızılötesi) görüntü alınan bölgeler



(a) R22 soğutucu akışkanı infrared görüntüsü



(b) R438A soğutucu akışkanı infrared görüntüsü



(c) R438A soğutucu akışkanı infrared görüntüsü

Şekil 3. Deney sisteminden alınan soğutucu akışkanlara ait infrared görüntüler

Alternatif gazların kullanımı sistem maliyeti açısından (revizyona ihtiyaç kalmadığından) daha uygun görülmüştür. Bu sayede, alternatif akışkanların soğutma etkinlik katsayısı (COP) geleneksel hesaplama yönteminin dışında, termal kamera ile alınan sıcaklık verileri kullanılarak, termal görüntü işleme analizi (kompresör, kondenser, evaporatör

yüzeylerinden alınacak termal görüntüler ile ana elamanların giriş-çıkışlarından alınacak termal görüntüler) olarak incelenerek, yapılacak soğutucu akışkan dönüşüm işlemlerine ve performanslarına ışık tutulması hedeflenmiştir.

3. SOĞUTMA SİSTEM PERFORMANSI İÇİN KIZILÖTESİ GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMLERİ

3.1. Öznitelik çıkartım yöntemi ile soğutma sistem performansı belirlenmesi

Üzerinde çalışılan görüntüden öznitelik çıkarma, görüntü analizi ve karar işlemleri için önemli bir adımdır. Görüntülerin içsel içeriğini mümkün olduğunca eksiksiz yansıtabilen ideal özelliklerin nasıl ayıklanacağı hala bilgisayar analiz sistemlerinde zor bir süreçtir. Görüntülerde öznitelik çıkartım yöntemlerini, renk, doku ve şekil olmak üzere üç ana başlık altında toplamak mümkündür. Önerilen çalışmada, kızılötesi görüntü kullanılmasından dolayı renk ve doku üzerine daha fazla yoğunlaşmıştır. Kızılötesi görüntü üzerinde istenilen bölgelerin seçimi yapıldıktan sonra aşağıda sırası ile verilen öznitelikler elde edilmektedir.

3.1.1. Standart sapma

Dijital görüntü işleme uygulamalarında histogram, görüntü seviyesi ile istatistiksel olasılığı arasındaki ilişkiyi göstermek için yaygın olarak kullanılmaktadır [11]. Görüntüdeki her bir pikselin, ortalamadan ne kadar uzakta ya da yakında toplandığı bilgisini veren değere standart sapma denir. Standart sapması küçük olması bir görüntüdeki değerlerin birbirine yakın olduğunu gösterir, büyük olması ise değerlerin birbirinden uzak olduğunu göstermektedir.

$$\sigma_g = \sqrt{\sum_{g=0}^{L-1} (g - \bar{g})^2 P(g)} \quad (1)$$

Eşitlik 1’de verildiği gibi $P(g)$ görüntünün birinci dereceden histogram olasılığı olup, şu şekilde tanımlanır:

$$P(g) = \frac{N(g)}{M} \quad (2)$$

Burada M görüntüde ki toplam piksel sayısını, $N(g)$ g renk tonunda ki piksel sayısını ifade etmektedir. Eşitlik 1’de verilen \bar{g} görüntünün ortalama değeri olup Eşitlik 3’de verildiği gibi bulunur [12].

$$\bar{g} = \sum_{g=0}^{L-1} gP(g) \quad (3)$$

3.1.2. Entropi

Entropi bir değişkendeki belirsizliği ölçmek için kullanılır. Değişkenin bütün değerleri birbirine eşit olduğunda belirsizlik yoktur ve entropi değeri sıfır olur. Ancak değişken tamamen birbirinden farklı değerler alıyorsa entropi maksimum değerine ulaşır [13].

$$Entropi = - \sum_{g=0}^{L-1} P(g) \log_2(P(g)) \quad (4)$$

3.1.3. Kontrast

Görüntünün en açık ve en koyu bölgeleri arasındaki farktır. Yüksek kontrastlı görüntü hem ışığın çok güçlü olduğu bölgelere hem de çok koyu gölgelik alanlara sahiptir. Küresel kontrast ölçüsü olarak Michelson eşitliği kullanılmış olup Eşitlik 5’de verildiği gibi ifade edilmektedir [14].

$$C = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (5)$$

Eşitlikteki C global kontrast değerini temsil ederken maksimum parlaklık L_{max} ve minimum parlaklık L_{min} ile gösterilmiştir.

3.1.4. Çarpıklık

Renk bilgisi kızılötesi görüntülerinin en önemli özelliklerinden biridir. Seçilen bölge alanı belirlendikten sonra çarpıklık değeri Eşitlik 6’da verilmiştir. Seçilen bölge içerisinde piksel renk değerleri simetrik değildirler. Bundan dolayı, çarpıklık, kullanılan ortalamanın simetrik özelliğinden ne kadar uzak olabileceğini göstermektedir.

$$\gamma_i = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (f_{ij} - \mu_i)^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Eşitlik 6’da verildiği gibi f_{ij} değeri j . görüntü pikselinin i . kanaldaki renk değerini, μ_i i . kanalın renk ortalama değerini, N ise görüntüde ki toplam piksel sayısını temsil etmektedir. γ_i ise her bir kanaldaki çarpıklık değeridir.

3.1.5. Maksimum ve minimum yüzey sıcaklık değeri

Üzerinde çalışılmak için kesilen bölgenin maksimum, minimum ve ortalama sıcaklık değerleri analiz için gerekli öznelik verilerini oluşturmaktadır. Bunun için Eşitlik 7’de verildiği gibi maksimum ve minimum sıcaklık verilerinin elde edilmiş yöntemleri sunulmuştur.

$$\begin{aligned} T_{max} &= \max(T_{low} + (T_{high} - T_{low}) * T_I) \\ T_{min} &= \min(T_{low} + (T_{high} - T_{low}) * T_I) \end{aligned} \quad (7)$$

Eşitlik 7’de verildiği gibi T_I , renkli kızılötesi görüntünün gri termal görüntüye dönüştürülerek elde edilen giriş görüntüsünü, T_{low} ve T_{high} sıcaklık barının alt ve üst değerlerini göstermektedir.

3.1.6. Ortalama yüzey sıcaklık değeri

Belirlenen bölgenin kızılötesi görüntüsünde yer alan sıcaklık değerlerinin ortalama değeri Eşitlik 8’de verilmiştir.

$$T_{av} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N T_{low} + (T_{high} - T_{low}) * T_I}{M * N} \quad (8)$$

Eşitlik 8’de verilen, M ve N kesilen bölgenin boyut bilgileridir.

3.1.7. En yoğun yüzey sıcaklık değeri

Belirlenen bölgenin kızılötesi görüntüsünde en çok karşılaşılan sıcaklık değerini tespit etmek için Algoritma 1 kullanılmıştır.

Algoritma 1. En yoğun yüzey sıcaklık değeri belirleme kodu.

Adım 1. Her bir piksele karşılık gelen sıcaklık değerini bul.

Adım 2. En yoğun yüzey sıcaklık değerini bulma

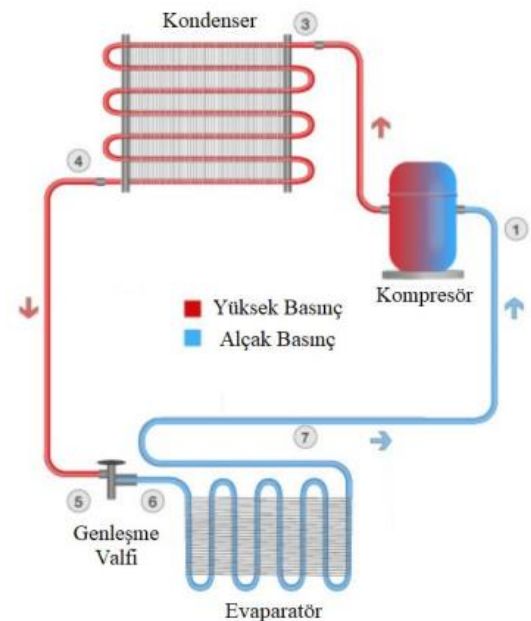
```
for i=1:satir
  for j=1:sütun
    değer=T_I(i,j);
    frekans(değer)=frekans(değer)+1;
  end
end
```

Adım 3. En yoğun sıcaklık değerini göster

Tyoğun =Max(frekans(değer));

3.2. COP yöntemi ile soğutma sistem performansı

Buhar sıkıştırırmalı soğutma sistemleri, düşük sıcaklıktaki bir ortamdan ısıyı çekerek yüksek sıcaklıktaki ortama aktaran ve böylece bulunduğu ortamı soğutan sistemlerdir. Sistemde, çevrim esnasında soğutucu akışkan çeşitli termodinamik işlemler geçirerek soğutma işini gerçekleştirilmektedir. Şekil 4’de görülen tek kademeli bir buhar sıkıştırırmalı soğutma sisteminin temel elemanları, kompresör, yoğuşurucu (kondenser), kısılma vanası ve buharlaştırıcıdan (evaporatör) oluşmaktadır. Bu çalışmada, sistemin performans analizi, termodinamiğin birinci kanununa göre yürütülmüştür. Soğutma sistemine ait birinci kanun analizinde, kondenser, kompresör ve evaporatör kapasiteleri, Şekil 4 üzerindeki çevrim noktaları göz önüne alınarak, sırasıyla aşağıdaki eşitlikler aracılığı ile hesaplanmaktadır [4].



Şekil 4. Bir buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminin şeması ve temel elemanları

$$\dot{Q}_{kond} = \dot{m}_{sa} \cdot (h_3 - h_4) \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{sa} \cdot (h_7 - h_6) \quad (10)$$

$$\dot{W}_{komp} = \dot{m}_{sa} \cdot (h_1 - h_2) \quad (11)$$

Kompresöre uygulanan elektrik gücü ise kompresör gücünün, elektrik ve mekanik verimlere bölünmesi ile bulunmaktadır.

$$\dot{W}_{komp,el} = \frac{\dot{W}_{komp}}{\eta_{el} \times \eta_{mek}} \quad (12)$$

Bir soğutma sisteminin performansı COP, soğutma etkinlik katsayısı ile değerlendirilir. İdeal buhar sıkıştırmalı bir soğutma çevrimi için soğutma etkinlik katsayısı Eşitlik 13’de verilen denklem ile tanımlanmaktadır.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_{komp,el}} \quad (13)$$

COP, soğutma sisteminin veriminin, sıkıştırma işleminde harcanan enerjinin, buharlaşmada soğurulan enerjiye oranı ile belirlenen miktarı veya ölçüsüdür. Sıkıştırma işleminde ne kadar az enerji harcanırsa, soğutma sisteminin etkinlik katsayısı COP, o kadar büyük olur. Bu yüzden, diğer özellikleri ve faktörleri eşit olan soğutucular arasından, en yüksek COP’a sahip olan soğutucu seçilmelidir. COP değerinin hesaplanması, birinci kanun analizinde, gaz soğutucusu sıcaklığı, evaporatör sıcaklığı, aşırı kızdırma sıcaklığı ve kompresör verimi değişimleri için gereklidir. Yukarıda verilen eşitliklerde (Eşitlik 9-13), h ilgili referans numarası ile gösterilen entalpi değerini (kJ/kg) göstermektedir. \dot{m}_{sa} soğutucu akışkan debisini (kg/s) belirtmektedir. Eşitlik 10, 12 ve 13’de verilen termodinamik denklemlerden esinlenilerek kızılötesi görüntü işleme yöntemlerinde kullanılabilir soğutma sistem performans katsayısı önerilmiştir. Önerilen $COP_{kögi}$ katsayısı Eşitlik 14’de verildiği gibi, sistemin yüzey sıcaklık bilgilerinin kullanımını esas almaktadır. Buradaki $COP_{kögi}$, kızılötesi görüntü işleme (kögi) olarak kısaltma kullanılmıştır.

$$COP_{kögi} = \frac{(Komp_{çıkış} - Komp_{giriş})}{(Evap_{çıkış} - Evap_{giriş})} \quad (14)$$

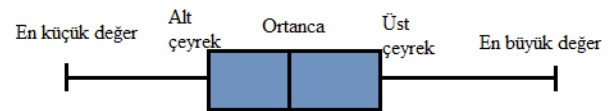
Eşitlik 14’de verilen $Komp_{çıkış}$ ve $Komp_{giriş}$, kompresörün giriş ve çıkış yüzey sıcaklık değerlerini, $Evap_{çıkış}$ ve $Evap_{giriş}$ ise evaporatörün giriş ve çıkış yüzey sıcaklık değerlerini temsil etmektedir. Önerilen çalışmada, R22, R438A ve R417A gazlarının kızılötesi görüntüleri üzerinde yukarıda ki dört bölge seçimi yapıldıktan sonra, elde edilen değerler Eşitlik 14’e uygulanmaktadır. Seçilen bölgelerde ortalama sıcaklık değeri esas alınmıştır.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Öznitelik çıkartım yöntemi ile soğutma sistem performans deneysel sonuçları

MATLAB (MATrix LABoratory) 1985 yılında C.B Moler tarafından matematik ortamında kullanılmak üzere geliştirilmiş olup, sayısal hesaplama, veri çözümleri ve

grafik işlemlerinde kullanılabilir genel amaçlı olmakla beraber, özel amaçlı modüler paketlere de sahip etkileşimli bir paket programlama dilidir [15]. MATLAB ’da problemler, komut satırında çalışan programlar yazarak çözülebileceği gibi, MATLAB GUI (Graphical User Interfaces) geliştirme aracını kullanarak, formlar ve butonlar gibi nesnelere oluşan görsel yazılımlar da oluşturulabilmektedir [16, 17]. Öznitelik Çıkartım Yöntemi (ÖÇY) olarak adlandırılacak olup, ara yüzü Şekil 5’de verilmiştir. Üzerinde çalışılan soğutma gazının kızılötesi görüntüsü yüklenerek, başlanmaktadır. Kızılötesi görüntüsünde yer alan sıcaklık bar göstergesinin alt ve üst sıcaklık değerleri girildikten sonra “Kes” butonuna basılır. “Kes” butonuna basılmasıyla görüntünün sol üst köşesi ve sağ alt köşesinden istenilen koordinat noktaları girilmektedir. Böylece deney setinin arka plan kısımları, sıcaklık bar göstergesi gibi istenilmeyen bölgeler kesilerek atılmaktadır. Ayrıca sözde renkli kızılötesi görüntü üzerinden her bir piksel için sıcaklık atama hesaplamaları bu bölümde yapılmaktadır. Bu işlemden sonra, kullanıcıdan kesilen görüntüyü kaç alt bölgeye ayırması gerektiği sorulur ve bunun için satır ve sütun bilgileri girilmektedir. Çalışma da bütün görüntüler 20x20 olmak üzere 400 alt bölge oluşturularak analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. “Bölütleme” butonuna basılmasıyla görüntü alt bölgeleri kırmızı çizgi ile belirlenmiş olarak ara yüzde, orta bölümde güncellenmektedir. İşlem hızını artırmak ve kullanıcının istediği bölgelere yoğunlaşmak için kullanıcıdan hangi bölgeleri istiyor ise o bölge numaraları girilerek, “Analize Başla” butonuna basılmaktadır. Seçilen bölgeler için standart sapma, entropi, kontrast, çarpıklık, maksimum, minimum, ortalama ve en yoğun sıcaklık öznitelik verileri elde edilmektedir. Ayrıca bölgelerin görüntüleri ve öznitelik eğrileri ara yüzün sol tarafında oluşmaktadır. ÖÇY, R22, R438A ve R417A gazları için 3 kızılötesi test görüntülerinde çalıştırılmıştır. Her bir test görüntüsü için 10 bölge belirlenerek 8 öznitelik elde edilmiştir. **Tablo 3**’ün sayısal sonuçlarına bakıldığında, gazların performans sonuçları için kesin bir sonuç cümlesi söylemek veya karşılaştırma yapmak zordur. Bunun için **Tablo 3**’de yer alan üç gazın öznitelik verileri ve belirlenen bölgeler için karşılaştırmalı kutu grafik çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kutu grafikleri değişkenin dağılım şeklini, merkez eğilimini ve yayılım düzeyini görmek ve bir değişkenin farklı kategorilerini birbiriyle karşılaştırmak için kullanışlı bir grafik türüdür. Bir veri setinin en küçük değer, alt çeyrek, ortanca, üst çeyrek ve en büyük değer olmak üzere beş sayılı özetini göstermektedir.

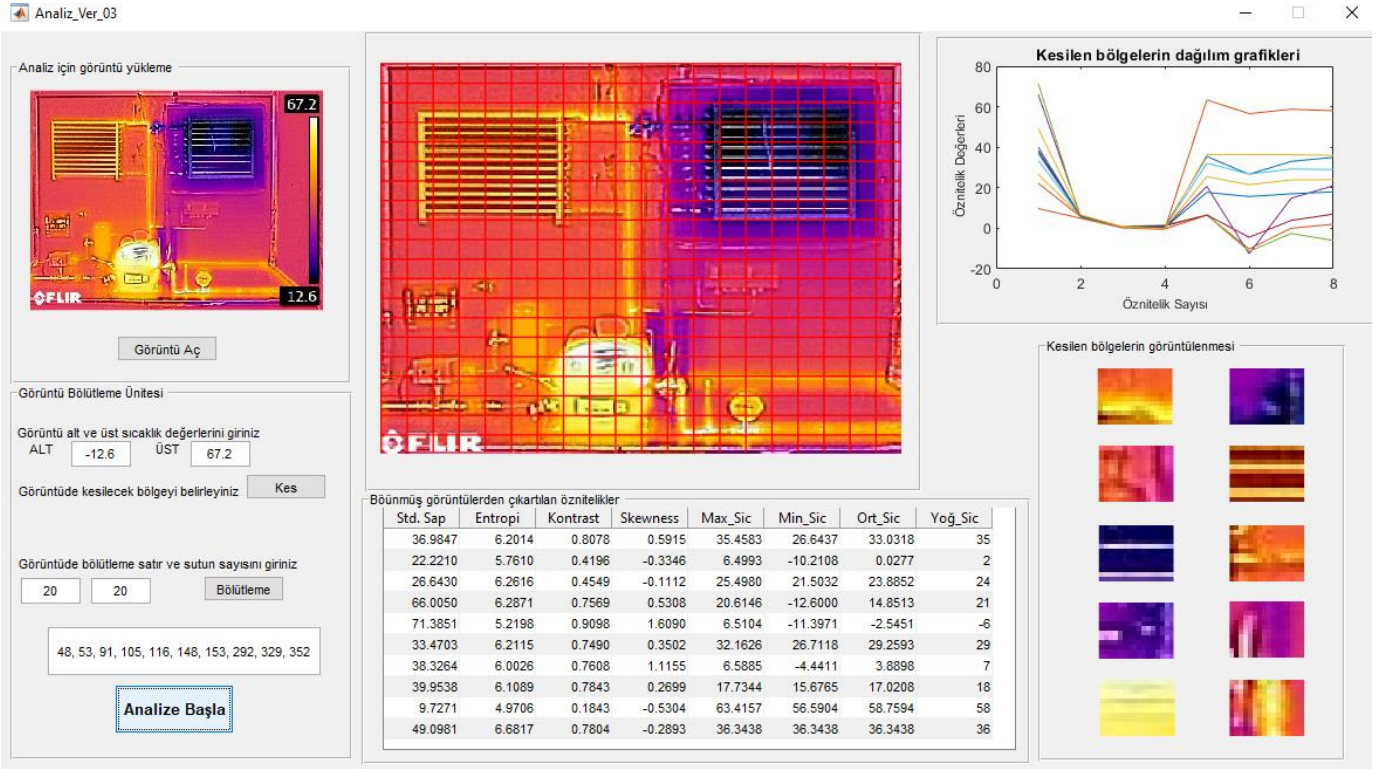


Şekil 6. Kutu grafiği ve bölümleri

Şekil 6’da görüldüğü gibi birinci çeyrekte üçüncü çeyreğe bir kutu çizilmektedir. Kutunun uzunluğu verilerin orta bölümlerde yayılma özelliğini vermektedir. Ortanca değer kutudan düşey bir çizgi ile geçmektedir. Verinin uç değerleri kolaylıkla görülmekte olup kutudan bu noktalara çizilen çizgi ile gösterilmektedir. Şekil 7’de görüldüğü gibi ÖÇY de

belirlenen bölgeler karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Her bir bölge görüntüsünün bütün gazlarda birbirlerine çok benzer olmaları yapılan görüntü alma ve bölgelerin elde edilme süreçlerinin hassas ve doğru yapıldığını göstermektedir. Şekil 7.'de verilen görsel karşılaştırma, aynı şekilde Tablo 3.'de verildiği üzere sayısal karşılaştırmada olduğu gibi, performans karşılaştırmaları veya benzerlikleri için bilimsel

bir sonuç elde etme yönünden yeterli değildir. Bunun için Şekil 7. ve Tablo 3. gazların performans karşılaştırmalarının görüntülerden alınan verilerin analiz edilerek gerçekleştirilebileceği sonucunu vermektedir.



Şekil 5. Matlab GUI öznelik çıkartım yöntemi ara yüzü

Tablo 3. Kullanılan gazların öznelik verileri

Kullanılan Gaz	Bölge No	Standart Sapma	Entropi	Kontrast	Çarpıklık	Maksimum Sıcaklık (°C)	Minimum Sıcaklık (°C)	Ortalama Sıcaklık (°C)	Yoğun Sıcaklık (°C)
R22	1	36,6833	6,1615	0,8078	0,5668	35,3073	26,6688	33,1339	35
	2	22,0723	5,6714	0,4157	-0,4939	6,4720	-8,3904	0,9701	3
	3	26,8951	6,1363	0,4824	-0,2508	25,3572	24,5039	24,8075	25
	4	66,0363	6,2439	0,7529	0,5303	20,6042	-12,6000	15,4080	21
	5	72,5085	5,3650	0,9098	1,4670	8,0104	-11,3111	-1,7654	8
	6	33,3421	6,1935	0,7373	0,3995	32,4176	26,5357	28,8928	29
	7	39,0315	5,7217	0,7333	1,3231	6,3277	-4,4732	3,5585	6
	8	41,1147	5,9001	0,7569	0,3608	18,0521	15,5177	17,2708	18
	9	9,7317	5,0100	0,1843	-0,5107	63,2381	56,5474	58,8153	58
	10	53,2030	6,7760	0,7882	-0,1830	36,2240	36,2240	36,2240	36

R438A	1	38,0885	6,4576	0,7098	-0,1814	32,5208	25,7958	31,6172	33
	2	27,5112	5,7803	0,6235	0,0182	9,4731	-9,4249	-0,0100	2
	3	26,2515	6,1035	0,5804	0,0342	26,4944	19,6666	21,4126	20
	4	80,8172	5,3689	0,8392	0,6535	16,3646	-11,0000	8,7909	16
	5	62,4135	5,7927	0,8157	1,3845	5,1563	-8,0589	-1,4210	5
	6	34,1888	6,1954	0,7176	-0,3053	32,4003	25,5389	27,1124	26
	7	42,9209	5,8744	0,7569	1,2369	9,3270	-4,4058	6,0444	7
	8	39,6146	5,2852	0,7465	0,3512	18,0402	13,2177	17,2452	18
	9	24,7249	5,1750	0,5059	-2,1834	48,4942	45,4583	46,1272	45
	10	47,9484	6,7031	0,7804	0,0820	28,3229	19,5795	27,2729	28
R417A	1	34,6510	6,1051	0,6667	0,6263	29,9792	24,5244	28,7198	30
	2	18,0584	5,3165	0,3569	-0,2330	9,4902	-5,3404	3,9494	4
	3	26,0992	6,1373	0,4078	-0,0354	20,4905	12,5472	17,4716	17
	4	66,9122	6,3828	0,7725	0,1575	23,1719	-10,1000	18,4552	23
	5	46,9458	5,4537	0,7176	1,4172	2,5052	-6,9146	-1,3101	-1
	6	32,6906	6,1934	0,7333	0,4949	28,1146	25,5027	27,4975	28
	7	35,1863	5,8219	0,7529	1,5207	5,2708	-1,8404	3,2072	5
	8	29,0314	5,7603	0,6196	0,2096	13,3907	8,9304	11,7171	13
	9	11,8201	4,9199	0,2706	-0,5267	51,4177	47,5103	48,2992	48
	10	54,9558	6,7278	0,7686	-0,0582	26,8125	26,8125	26,8125	27

Belirlenen Bölge No	R22	R438A	R417A
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Şekil 7. Üç gazın belirlenen bölge kızılötesi görüntüleri

Şekil 8 'de kullanılan 3 gazın 8 öznitelik değeri yönünden karşılaştırmalı kutu grafiklerine yer verilmiştir. **Şekil 8** a, c, e, f ve g ortalama yönünden, **Şekil 8** b, d, e, f ve h alt ve üst çeyrek yönünden, **Şekil 8** c, d, g ve h üst limit yönünden, **Şekil 8** d, e, f, g ve h alt limit yönünden R22 ve R438A birbirlerine çok yakındır. Özellikle standart sapma, entropi, maksimum, minimum ve ortalama sıcaklık öznitelik verileri R22 ve R438A gazlarının birbirlerine benzer olduğunu göstermektedir. Ayrıca çarpıklık ve en yoğun sıcaklık öznitelik değerleri bakımından R438A ile R417A birbirine benzer, kontrast öznitelik karşılaştırmasında R417A ile R22 birbirine benzer çıkmıştır. Sonuç olarak, öznitelik veri karşılaştırmasında R22 gazı performans sonuçları R438A'ya daha yakındır. ÖÇY'nin uygunluğunu ve performansını daha iyi test etmek amacıyla bölgelerin üç gaz için karşılaştırılması **Şekil 9**'da yapılmıştır.

Grafikler incelendiğinde R22 gaz sonuçlarının 2, 4, 5, 7 ve 9. bölgelerde daha normal bir dağılıma sahip olduğu, buna karşın 1, 3 ve 6. bölgelerde görüldüğü gibi, R438A gazının öznitelik değerlerinin daha yüksek rakamlarda toplandığı tespit edilmiştir. Yani 5 bölge için R22, 3 bölge için R438A gazının daha başarılı oldukları görülmektedir. **Şekil 9** 1, 2, 3, 4, 6 ve 8. bölgeleri için R22 ve R438A gazları, **Şekil 9** 7 ve 9. bölgeleri için ise R22 ve R417A gazları birbirlerine yakın performans göstermişlerdir. Ayrıca **Şekil 9** 10. bölge için R438A ve R417A gazları benzer ve **Şekil 9** 5. bölge için ise üç gazda birbirine yakın performans göstermişlerdir. **Şekil 9**'da ki ÖÇY 'nin bölgesel görsel sonuçlarına göre, sırasıyla R22, R438A ve R417A performans sıralaması yapılabilir. Ek olarak bölgesel performans benzerliğinde R22 gazına en yakın gaz R438A çıkmıştır.

4.2. COP yöntemi ile soğutma sistem performans deneysel sonuçları

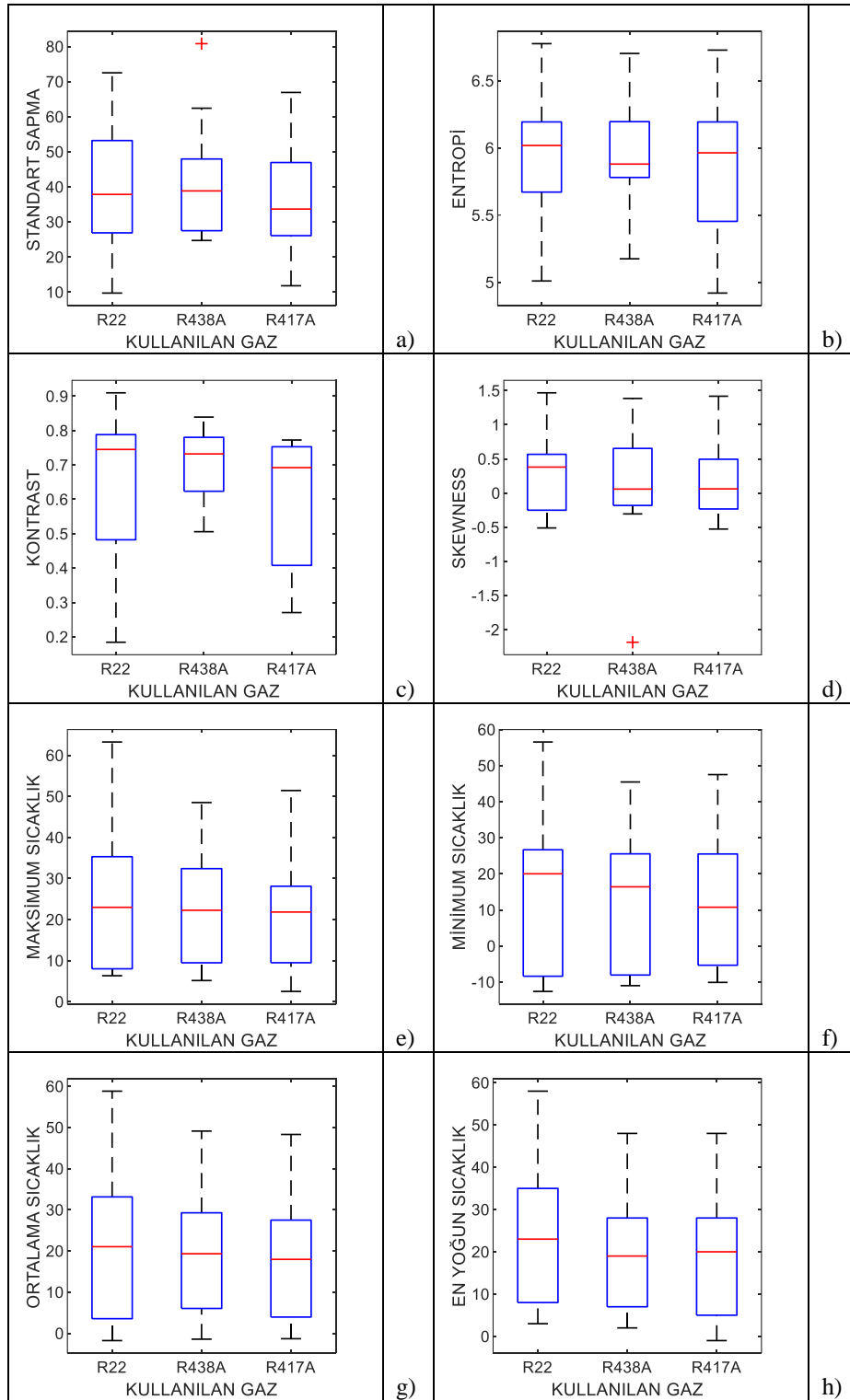
COP yöntemi ile soğutma sistem performans ara yüzü **Şekil 10**'da verilmiştir. ÖÇY yönteminde olduğu gibi COP yöntemin kızılotesi görüntülerin analiz işlemine sokulması için ön hazırlık çalışmaları yer almaktadır. COP yönteminde evaporatör giriş ve çıkış ile kompresör giriş ve çıkış

bölgeleri için bölümlenmiş görüntü üzerinden bölge numaraları girilmelidir. “Analize Başla” butonuna basıldıktan sonra, ara yüzün sol alt tarafında ilgili gazın COP değeri yazılmaktadır. Ayrıca üzerinde çalışılan dört bölge görüntüsü ve hesaplamaya katılan sıcaklık değerleri tablo halinde sol kısımda oluşmaktadır.

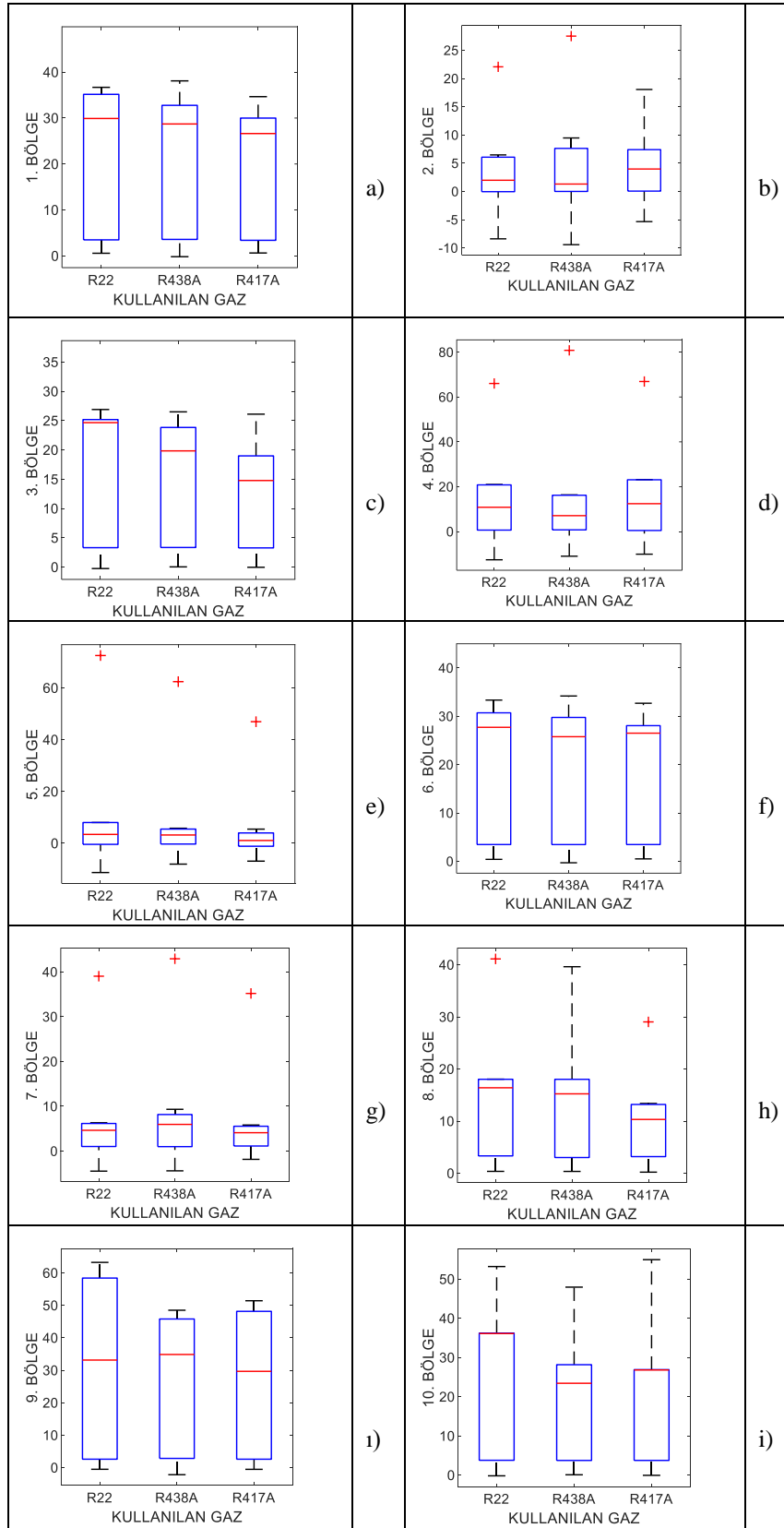
Tablo 4. Kullanılan gazların COP sonuçları

Gaz	Bölge	Sıcaklık (°C)	COP
R22	Evaporatör Giriş	-2,3791	3,6231
	Evaporatör Çıkış	1,9503	
	Kompresör Giriş	18,7736	
	Kompresör Çıkış	34,4593	
R438A	Evaporatör Giriş	-2,4081	3,5653
	Evaporatör Çıkış	1,1318	
	Kompresör Giriş	17,4287	
	Kompresör Çıkış	30,0493	
R417A	Evaporatör Giriş	-3,2319	2,9617
	Evaporatör Çıkış	1,1500	
	Kompresör Giriş	12,4807	
	Kompresör Çıkış	25,4585	

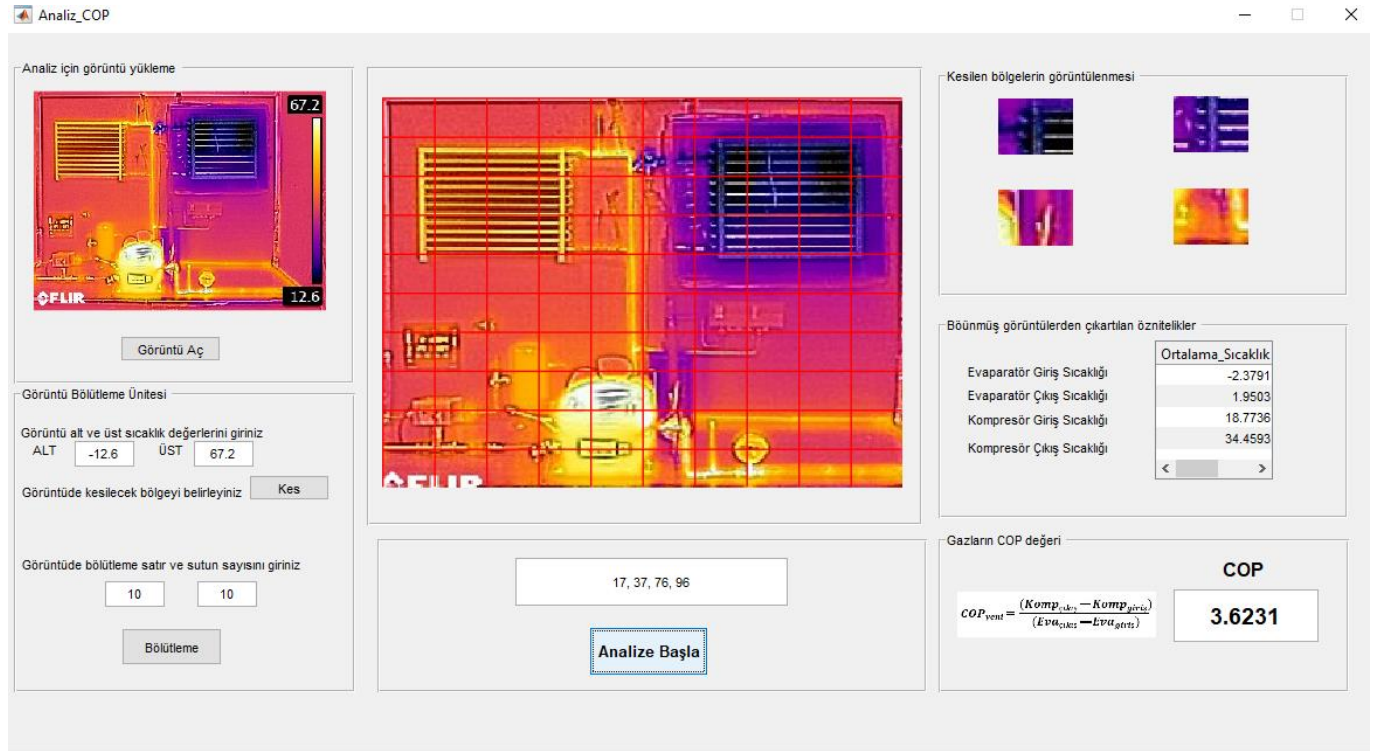
COP, R22, R438A ve R417A gazları için 3 kızılotesi test görüntülerinde çalıştırılmıştır. Her bir test görüntüsü için 4 bölge üzerinden COP değeri hesaplanmıştır. **Tablo 4**'ün sayısal sonuçlarına bakıldığında, üç gazda birbirine yakın performans göstermişlerdir. COP'un sayısal sonuçlarına göre, sırasıyla R22, R438A ve R417A performans sıralaması yapılabilir. Ek olarak bölgesel performans benzerliğinde R22 gazına en yakın gaz R438A çıkmıştır.



Şekil 8. Üç gazın öznitelik verileri yönünden karşılaştırmalı kutu grafikleri



Şekil 9. Üç gazın belirlenen bölge verileri yönünden karşılaştırmalı kutu grafikleri



Şekil 10. Matlab GUI öznetelik çıkartım yöntemi ara yüzü

5. SONUÇ

Bu çalışmada, R22 akışkanına alternatif olan ve ozon tabakasına dost R417A ve R438A akışkanlarının ticari soğutma sistemlerine yönelik performans analizi önerilmiştir. Matlab GUI ara yüzü ve kızılötesi görüntüleme kullanılarak öznetelik veri elde edinimi ve yeni bir COP soğutma etkinlik katsayısı olmak üzere iki yöntem kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, kızılötesi görüntüleme sayesinde soğutma sisteminin başarılı bir şekilde uzaktan performans analizinin gerçekleştirilebileceği ispatlanmıştır. Öznetelik veri elde ediniminde, standart sapma, entropi, maksimum, minimum ve ortalama sıcaklık değerleri R22 ve R438A gazlarının birbirlerine benzer olduğunu göstermektedir. Ayrıca yeni COP'un sayısal sonuçlarına göre, sırasıyla R22 (3,6231), R438A (3,5653) ve R417A (2,9617) performans sıralaması yapılmıştır. Geliştirilen kızılötesi görüntü işleme ile performans testi uygulamasında çalıştırılabilirliği ortaya konmuştur. Yapılan çalışmada kullanılan kızılötesi görüntüleme ile sensor montajı, maliyeti ve kablolama problemi ortadan kaldırılmış, ara yüz özelliği ile daha görsel hale getirilmiştir. Sistem için geliştirilen yazılım, kullanıcı için kolay programlanabilir özellikte olup, eş zamanlı kayıt ve grafik çizim özelliklerine sahiptir. Çalışmanın sonunda, R22 soğutucu akışkanına alternatif olarak geliştirilen R417A ve R438A akışkanlarından, R438A akışkanının daha yüksek COP değerine sahip olduğu görülmüştür. İncelenen 3 akışkan için R22 akışkanına en iyi alternatifin R438A olduğu tespit edilmiştir. Ticari tip soğutma sistemlerinde kullanılacak en uygun alternatif soğutucu akışkan belirlenmiştir. Sensörsüz uzaktan algılamanın bu sistemlere uygulanması ve sistem

performansı, insan gücü maliyetini ile zaman tasarrufunu elde edilerek sağlanmıştır.

TEŞEKKÜR

Çalışmamız Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi (No: 2019.21.02.983) tarafından desteklenmiştir.


KAYNAKÇA


- [1]. C. C. Allgood ve C. C. Lawson, "Performance of R-438A in R-22 refrigeration and air conditioning systems," International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, Indiana, 2010.
- [2]. M. Baraz, "Alternatif soğutucu kullanılan doğrudan genleşmeli soğutma sistemlerinde evaporatör ve kondenser kapasitesine etki eden parametrelerin incelenmesi," Doktora Tezi, 2011.
- [3]. Bock Compressor, "Alternative Refrigerants Information on use of R22," 7 Nisan 2020. URL: http://www.bock.de/media/files/PDF/Produktinformat ionen/96151_Alternative-refrigerants_R22_Gb.pdf.
- [4]. A. Ergün, A. E. Gürel ve İ. Ceylan, "Ticari tip soğutma sistemlerinde R22 akışkanının alternatifi olarak R438A ve R417A akışkanlarının performansının incelenmesi," Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, cilt 6, no. 4, pp. 824-833, 2018.
- [5]. A. La Rocca, V. La Rocca, A. Messineo ve D. Panno, "Use of HFC fluids as suitable replacements in low-temperature refrigeration plants," Journal of Engineering and Applied Sciences, cilt 9, no. 1, pp. 74-79, 2014.


- [6]. Z. Cingiz, F. Katırcıoğlu, Y. Çay ve A. Kolip, "Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Sisteminde R22 Alternatifi Soğutucu Akışkanların Termodinamik Analizi," *Politeknik Dergisi*, 2020.
DOI: 10.2339/politeknik.548115
- [7]. M. Çalışan ve İ. Türkoğlu, "Termal Kameralar ve Uygulamaları," *Elektrik-elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, FEED 2011, Elazığ*, 2011.
- [8]. M. Weinmann, J. Leitloff, L. Hoegner, B. Jutzi, U. Stilla ve S. Hinz, "Thermal 3D mapping for object detection in dynamic scenes," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, cilt 2, no. 1, p. 53, 2014.
- [9]. F. Katırcıoğlu, Y. Çay ve Z. Cingiz, "Infrared image enhancement model based on gravitational force and lateral," *Infrared Physics and Technology*, cilt 100, pp. 15-27, 2019.
- [10]. Climalife IDS Refrigeration Limited, "HFC Refrigerants," URL: <https://www.climalife.co.uk/refrigerants-hfc-refrigerants>. [Erişildi: 12 Nisan 2020].
- [11]. Jiang, H., Zeng, L., ve Bi, B., "A comprehensive method of contour extraction for industrial computed tomography images," *Optics and Lasers in Engineering*, 51(3), 286-293, 2013.
- [12]. Duan, L., Yao, M., Wang, J., Bai, T., ve Zhang, L., "Segmented infrared image analysis for rotating machinery fault diagnosis," *Infrared Physics & Technology*, 77, 267-276, 2016.
- [13]. Barbieri, A. L., De Arruda, G. F., Rodrigues, F. A., Bruno, O. M., ve da Fontoura Costa, L., "An entropy-based approach to automatic image segmentation of satellite images," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 390(3), 512-518, 2011.
- [14]. Simone, G., Pedersen, M., ve Hardeberg, J. Y., "Measuring perceptual contrast in digital images," *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 23(3), 491-506, 2012.
- [15]. T. Haigh, "Cleve Moler: Mathematical software pioneer and creator of Matlab," *IEEE Annals of the History of Computing*, 30(1), 87-91, 2008.
- [16]. The MathWorks, Inc., "Creating graphical user interfaces," The MathWorks, Nantick, MA, 2002.
- [17]. F. Katırcıoğlu, "Real-time infrared image processing for control and monitoring of greenhouse system," *Journal of Applied Remote Sensing*, cilt 14, no. 2, p. 026503, 2020.

Farklı Mineral Katkılı Yüksek Dayanımlı Betonlarda Metagabro Agregalarının Kullanılabilirliğinin Araştırılması

*¹İsmail İsa Atabey, ²Serhat Çelikten, ³Ümit Yurt

¹Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Müh. Mim. Fak., İnşaat Müh. Böl., ismailatabey@nevsehir.edu.tr, 

²Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Müh. Mim. Fak., İnşaat Müh. Böl., serhatcelikten@nevsehir.edu.tr, 

³Düzce Üniversitesi, Düzce MYO, İnşaat Böl., umityurt@duzce.edu.tr, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 24.03.2020

Kabul Tarihi: 10.07.2020

Öz

Günümüzde yüksek dayanımlı betonlar (YDB) geniş bir kullanım alanına sahiptir. Fakat beton karışımları ile ilgili agrega türü, özellikleri, dağılımı ve mineral katkıların kullanım oranları mekanik ve fiziksel özelliklerine önemli etkileri olmaktadır. Bu çalışmada, kalker ve metagabro agregaları ayrı ayrı kullanılarak yüksek dayanımlı betonlar üretilmiş ve agrega türünün betonların özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla iki farklı agrega grubu, iki farklı F sınıfı uçucu kül ve silis dumanı ile 12 karışım hazırlanarak üretilen numunelere birim ağırlık, yoğunluk, su emme ve boşluk oranı, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı deneyleri uygulanmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,40, çimento dozajı 400 kg olarak belirlenmiştir. Karışımlara %10 oranında mineral katkılar ayrı ayrı ve ikili karışımlar şeklinde ilave edilmiştir. Kıvamı 15±2 cm değerinde tutabilmek için beton karışımlarına %1 oranında hiper akışkanlaştırıcı eklenmiştir. Metagabro agregaları ile üretilen betonlarda en yüksek 28 günlük basınç dayanımı (76,7 MPa) Sugözü uçucu külü ve silis dumanının beraber kullanıldığı karışımlarda elde edilmiştir. Kalker tipi agregalar ile 81,4 MPa elde edilmiştir. Hem metagabro hem kalker tipi agrega grubu ile yüksek dayanımlı beton elde edilebilirken, kalker tipi agregalar ile üretilen betonlarda %15'e varan oranlarda daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kalker, Metagabro, Mineral katkı, Yüksek dayanımlı beton

Investigation on the Use of Metagabro Aggregates in High Strength Concretes Made with Different Mineral Additives

*¹İsmail İsa Atabey, ²Serhat Çelikten, ³Ümit Yurt

¹Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Müh. Mim. Fak., İnşaat Müh. Böl., ismailatabey@nevsehir.edu.tr,

²Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Müh. Mim. Fak., İnşaat Müh. Böl., serhatcelikten@nevsehir.edu.tr,

³Düzce Üniversitesi, Düzce MYO, İnşaat Böl., umityurt@duzce.edu.tr,

Abstract

Today, high strength concretes (HSC) have a wide usage area. However, considering the type, properties and gradation of aggregates, and amount of mineral additives used in concrete mixtures have important effects on their mechanical and physical properties. In this study, high strength concretes were produced by using limestone and metagabro aggregates separately and the effects of aggregate type on the properties of concretes were investigated. For this purpose, 12 different mixtures were prepared with two different aggregate groups, two different F class fly ash and silica fume, and unit weight, density, water absorption and porosity, compressive strength and ultrasonic pulse velocity tests were applied. Water to binder ratio and cement dosage of mixtures are determined constant as 0,40, as 400 kg/m³, respectively. For the constant slump value of 15 ± 2 cm, 1% hyperplasticizer was added to the mixtures. The highest 28 days' strength of the concretes made with metagabro aggregates was 76.7 MPa obtained on the mixture produced with binary mixture of Sugözü fly ash and silica fume. It was obtained as 81.4 MPa with limestone aggregates. While high-strength concrete can be obtained with both metagabro and limestone type aggregates, up to 15% higher compressive strength has been achieved in concretes produced with limestone-type aggregates..

Keywords: Limestone, Metagabro, Mineral additive, High strength concrete

1. GİRİŞ

Dünyadaki beton tüketimi 2012 yılı itibariyle 10 milyar metreküpü aşmıştır [1]. Bu devasa tüketim her geçen gün artarak devam etmekte ve 2050 yılı itibariyle de 18 milyar tona ulaşacağı tahmin edilmektedir [2]. Artan tüketim ile beton üretiminde kullanılan hammaddelerin sürdürülebilirliği sorgulanır hale gelmiştir. Ekonomikliği ve yüksek dayanımı nedeniyle betonda en çok kullanılan malzeme olan agregalar için de tedarik sorunu meydana gelmeye başlamıştır. Bu nedenle çeşitli kayalardan elde edilen agregaların beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması da sürdürülebilir beton üretimi için elzemdir. Bu amaçla agrega türünün betonun mekanik ve durabilite özellikleri üzerine etkileri daha önce birçok araştırmacı tarafından irdelenmiştir.

Aitcin ve Mehta [3] benzer karışım oranları ile diyabaz, kireçtaşı, granit ve dere agregalarını ayrı ayrı kullanarak betonlar üretmişlerdir. Araştırmacılar diyabaz ve kireçtaşı agregaları ile ürettikleri betonların basınç dayanımlarının granit ve dere agregaları ile ürettikleri betonlara göre daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir. Bishr ve ark. [4] yüksek dayanımlı betonların basınç ve yarmada çekme dayanımları üzerine iri agrega türünün etkilerini araştırmışlardır. Deney sonuçları demir-çelik cürufu agregası ile üretilen betonların kireçtaşı ile üretilenlere göre daha yüksek basınç ve yarmada çekme dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. Ezeldin ve Aitcin [5] dört farklı iri agrega ile normal ve yüksek dayanımlı betonlar üretmişler ve ürettikleri betonların eğilme ve basınç dayanımlarının agrega türüne göre değişimini araştırmışlardır. Araştırmacılar, ürettikleri normal dayanımlı betonların dayanımlarında agrega türüne göre önemli bir değişim gözlememişlerdir. Ancak, kireçtaşı ile üretilen yüksek dayanımlı betonların çakıl veya granit ile üretilenlere göre daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Kılıç ve ark. [6] bazalt, gabbro, kuvarzit, kireçtaşı ve kumtaşı agregaları ile ayrı ayrı ürettikleri yüksek dayanımlı betonların dayanım ve aşınma özelliklerine agrega türünün etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar basınç dayanımlarının yüksekteki düşüğe sırasıyla bazalt, gabbro, kireçtaşı, kuvarzit ve kumtaşı kullanılan betonlarda elde edildiğini rapor etmişlerdir. En yüksek eğilme dayanımı ise gabro ile üretilen betonlarda gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, gabro ve bazalt agregası ile üretilen betonların aşınma direncinin diğer betonlara kıyasla daha yüksek olduğunu ve kum taşı ile üretilen betonların diğer betonlarda göre daha düşük aşınma direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Diğer taraftan bir tür entrüsiv volkanik kayaç olan metagabronun da beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması da sürdürülebilir üretim, yerel kaynakların değerlendirilmesi ve performans değerlemesi açısından önem arz etmektedir. Ancak, metagabro kayalarının betonda agrega olarak kullanılabilirliğine dair halen yeterli sayıda çalışma yapılmamıştır. Çimento üretimi 2010 yılı verilerine göre küresel CO₂ salınımının yaklaşık %7'sinden sorumludur [7]. Bu devasa salınım bilim insanlarının çimento içeriği daha az beton üretilebilirliğini araştırmaya sevk etmiştir [8].

Geleneksel betona göre daha çevreci, ekonomik ve yüksek performanslı beton üretmenin bir yolu da çimento yerine çimento ile birlikte çeşitli puzolanların kullanılmasıdır. Bu amaçla, uçucu kül [9,10] silis dumanı [11,12], yüksek fırın cürufu [13,14], pirinç kabuğu külü [15,16] ve metakaolin [17,18] gibi birçok doğal ve yapay puzolanın normal ve yüksek dayanımlı betonda kullanılabilirliği ve beton özelliklerine etkileri araştırılmış ve araştırılmaya halen devam etmektedir. Bununla birlikte, çimento yerine kullanılan puzolanın kimyasal ve fiziksel karakteristiği betonun özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Bu nedenle de, özellikle endüstriyel atıklarla üretilen betonların özellikleri farklılık göstermektedir. Bu çalışmada, betonda yaygın olarak kullanılan kalker agregası ile betonda kullanımı noktasında daha az araştırılan metagabro agregaları ayrı ayrı kullanılarak yüksek dayanımlı betonlar üretilmiş ve agrega türünün üretilen betonların özelliklerine etkileri irdelenmiştir. Ayrıca Çatalağzı (Zonguldak) ve Sugözü (Adana) Termik Santrallerinden alınan iki farklı uçucu kül ve Antalya Eti Elektrometalurji tesisi atığı olan silis dumanının yüksek dayanımlı betonların birim ağırlık, yoğunluk, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı, su emme ve boşluk oranına etkileri araştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Çimento ve Mineral Katkılar

Çalışmada TS EN 197-1'e [19] uygun CEM I 42,5R tipi çimento (PÇ) kullanılmıştır. Mineral katkı olarak ASTM C618 [20] standardına göre iki farklı F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Adana ili Yumurtalık ilçesi Sugözü köyünde bulunan Sugözü Termik Santrali Uçucu Külü (SG UK) ve Zonguldak ili Çatalağzı beldesinde bulunan Çatalağzı Termik Santrali Uçucu Külü (ÇA UK) temin edilmiştir. Silis dumanı (SD) Antalya Ferrokrom tesislerinden elde edilmiştir. Çimento ve mineral katkılara ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 1'de verilmiştir

Tablo 1. Çimento ve mineral katkıların kimyasal ve fiziksel özellikleri

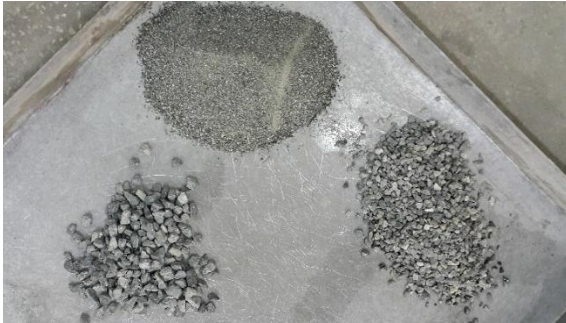
Özellik	PÇ	SG UK	ÇA UK	SD
SiO ₂ (%)	18,80	60,51	54,68	93,10
Al ₂ O ₃ (%)	5,81	21,69	25,94	0,55
Fe ₂ O ₃ (%)	2,61	7,85	6,81	1,35
CaO (%)	62,90	1,52	3,12	0,49
MgO (%)	1,29	1,65	1,55	0,36
SO ₃ (%)	2,74	0,53	0,34	0,1
Na ₂ O (%)	0,74	0,92	0,39	0,29
K ₂ O (%)	-	-	-	0,91
Ser. CaO (%)	0,70	0,18	0,02	-
Cl (%)	0,033	0,010	0,004	-
K. K. (%)	3,27	2,42	3,30	2,85
>45 Mik. (%)	-	18,47	29,0	-
Yoğ. (g/cm ³)	3,15	2,29	2,13	2,31

2.2. Agregalar

Beton karışımlarında maksimum tane boyutu 22,4 mm olan iki farklı metagabro (Şekil 1) ve kalker agregası (Şekil 2) ayrı ayrı kullanılmıştır. Agregalara ait değerler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Agregalar tane dağılım grupları ve özgül ağırlıkları

Agregalar	Özellik	Gradasyon Yüzdeleri	Özgül Ağırlık
Metagabro	0-5 mm	%45	2,69
	5-12 mm	%34	2,78
	12-22.4 mm	%21	2,79
Kalker	0-5 mm	%45	2,74
	5-12 mm	%34	2.72
	12-22.4 mm	%21	2,71



Şekil 1. Metagabro agregası



Şekil 2. Kalker agregası

2.3. Hiper Akışkanlaştırıcı ve Su

Beton üretiminde karışım suyunu yüksek oranda azaltan TS EN 934-2+A1 [21] standardına uygun hiper akışkanlaştırıcı beton katkısı Polydos EG 450 kullanılmıştır. Katkı özellikleri Tablo 3’de verilmiştir. Karışım hazırlamada TS EN 1008’e [22] göre içilebilir musluk suyu kullanılmıştır.

Tablo 3. Hiper akışkanlaştırıcı katkının özellikleri

Kimyasal Özelliği	Polikarboksilat Esaslı
Renk-Görünüm	Kahverengi Sıvı
Yoğunluk	1,05±0,02 kg/l
Alkali İçeriği (TS EN 480-12)	<%4
Klor İçeriği (TS EN 480-10)	<%0,1

2.4. Yöntem

Bu çalışmada, bağlayıcı çimento dozajı birim metreküp için 400 kg’dır. Su/bağlayıcı oranı 0,40’tır. Deneysel çalışmalarda hazırlanan karışımların çökme değerleri 15 ± 2 cm olacak şekilde çimento ağırlığının %1 oranında hiper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Beton karışımlarında mineral katkı olarak Sugözü Uçucu Külü, Çatalağzı Uçucu Külü ve Silis Dumanı toplam çimento oranının %10’u kadar kullanılmıştır. İki farklı (metagabro M ve kalker tipi K) agregalar için hacimce eş değer oranlarda üç grup agregalar ile karışım hazırlanarak $100 \times 100 \times 100$ mm numuneler üretilmiştir (Şekil 3 ve Şekil 4). 0-5 mm agregalar %45, 5-12 mm agregalar %34 ve 12-22,4 mm agregalar %21 oranında alınarak 1 m^3 beton için karışım miktarları Tablo 4’te verilmiştir. Laboratuvar çalışması sonucu üretilen 12 grup beton numunelerine 28 gün sonunda birim ağırlık ve yoğunluk, su emme ve boşluk oranı, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı deneyi uygulanmıştır.



Şekil 3. Metagabro agregası ile hazırlanan numuneler



Şekil 4. Kalker agregası ile hazırlanan numuneler

Tablo 4. 1 m³ karışıma giren malzeme miktarları

Agrega Tipi	Karışım No	Çimento, kg	(UK-1) Sugözü Uçucu Külli, kg	(UK-2) Çatalağı Uçucu Külli, kg	(SD) Silis Dumanı, kg	Hiper Akışkanlaş. kg	S/B	Su, kg	0-5 mm (%45), kg	5-12 mm (%34), kg	12-22.4 mm (%21), kg
Metagabro	M0	400	-	-	-	4	0,40	160	862,4	651,6	402,4
	M1	400	40	-	-	4	0,40	160	840,8	635,3	392,4
	M2	400	-	-	40	4	0,40	160	839,9	634,6	392,0
	M3	400	20	-	20	4	0,40	160	840,4	635,0	392,2
	M4	400	-	40	-	4	0,40	160	839,2	634,1	391,6
	M5	400	-	20	20	4	0,40	160	839,6	634,3	391,8
Kalker	K0	400	-	-	-	4	0,40	160	858,0	648,3	400,4
	K1	400	40	-	-	4	0,40	160	836,5	632,1	390,4
	K2	400	-	-	40	4	0,40	160	835,7	631,4	390,0
	K3	400	20	-	20	4	0,40	160	836,1	631,7	390,2
	K4	400	-	40	-	4	0,40	160	836,5	632,1	390,4
	K5	400	-	20	20	4	0,40	160	836,1	631,7	390,2

3. BULGULAR

3.1. Birim Ağırlık ve Yoğunluklar

Çalışmada üretilen numunelerin ağırlıkları alınıp numune hacmine bölünerek birim ağırlıkları hesaplanmıştır. Ayrıca beton örneklerinin Arşimet yöntemi ile sudaki ağırlık, suya doygun ve etüv kuru ağırlıkları tartılarak yoğunlukları belirlenmiştir. TS EN 12390-7 [23] standardına göre elde edilen sonuçlar Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir.

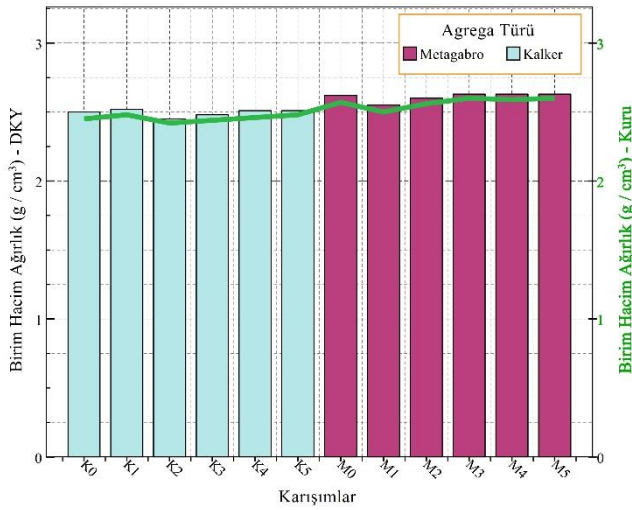
Tablo 5. Metagabro agregası içeren betonlara ait birim ağırlık ve yoğunluk deney sonuçları

Karışım No	Birim Ağırlık, g/cm ³ (DKY)	Birim Ağırlık, g/cm ³ (Kuru)	Görünür Yoğunluk, g/cm ³	Kuru Yoğunluk, g/cm ³	DKY Yoğunluk, g/cm ³
M0	2,62	2,57	2,62	2,50	2,54
M1	2,55	2,50	2,60	2,47	2,52
M2	2,60	2,56	2,59	2,50	2,54
M3	2,63	2,60	2,61	2,52	2,55
M4	2,63	2,59	2,63	2,52	2,56
M5	2,63	2,60	2,62	2,54	2,57

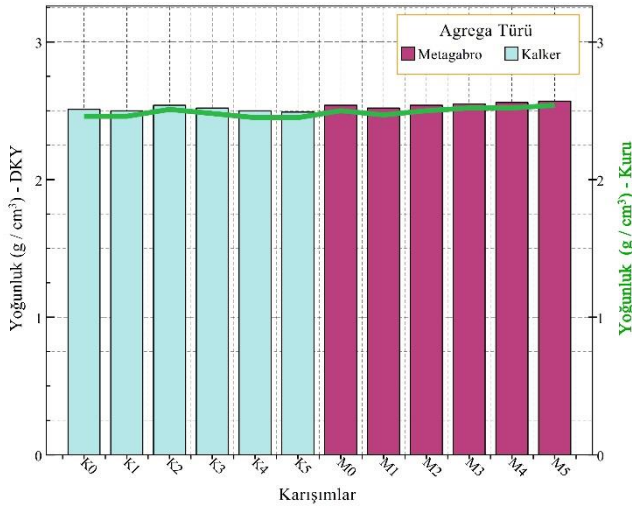
Tablo 6. Kalker agregası içeren betonlara ait birim ağırlık ve yoğunluk deney sonuçları

Karışım No	Birim Ağırlık, g/cm ³ (DKY)	Birim Ağırlık, g/cm ³ (Kuru)	Görünür Yoğunluk, g/cm ³	Kuru Yoğunluk, g/cm ³	DKY Yoğunluk, g/cm ³
K0	2,50	2,45	2,60	2,46	2,51
K1	2,52	2,48	2,57	2,46	2,50
K2	2,45	2,42	2,59	2,51	2,54
K3	2,48	2,44	2,58	2,48	2,52
K4	2,51	2,46	2,57	2,45	2,50
K5	2,51	2,48	2,54	2,45	2,49

Metagabro tipi agregası kullanılarak üretilen YDB'lerin DKY birim ağırlıkları 2,55-2,63 g/cm³, kuru birim ağırlıklar 2,50-2,60 g/cm³, görünür yoğunlukları 2,59-2,63 g/cm³, kuru yoğunlukları 2,47-2,54 g/cm³, DKY yoğunlukları 2,52-2,57 g/cm³ arasında hesap edilmiştir (Tablo 5). Kalker tipi agregası kullanılarak üretilen YDB'lerin DKY birim ağırlıkları 2,45-2,52 g/cm³, kuru birim ağırlıklar 2,42-2,48 g/cm³, görünür yoğunlukları 2,54-2,60 g/cm³, kuru yoğunlukları 2,45-2,51 g/cm³, DKY yoğunlukları 2,49-2,54 g/cm³ arasında hesap edilmiştir (Tablo 6).



Şekil 5. Agrega türüne göre birim ağırlıkların değişimi



Şekil 6. Agrega türüne göre yoğunlukların değişimi

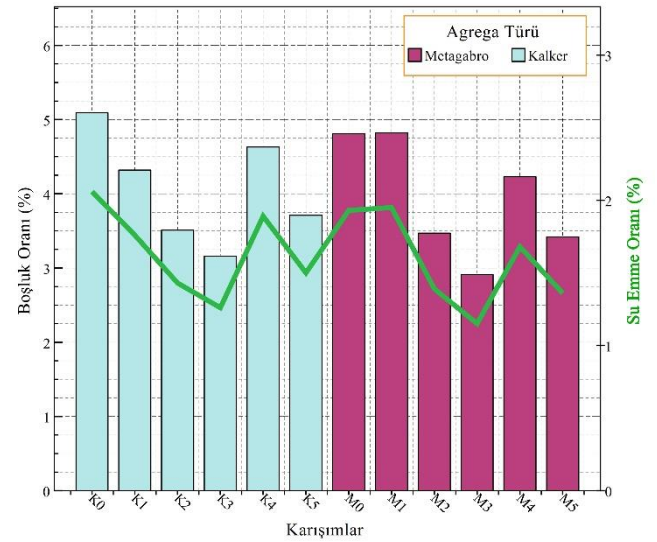
Metagabro gurubu agregaların yoğunlukları kalker agregasından fazla olduğu için genel olarak yoğunluk ve birim ağırlık değerleri metagabro agregalı yüksek dayanımlı betonlarda daha yüksektir (Şekil 5 ve Şekil 6). Her iki agrega tipi için de farklı mineral katkıların yoğunluklarının birbirine yakın olması YDB'lerin birim ağırlık ve yoğunluklarında büyük farklar oluşturmamıştır. Yüksek dayanımlı beton olduğu için hiper akışkanlaştırıcı ile su oranı azaltılarak boşluklar azalmış böylece yoğunluklar ile birim ağırlıklar arasında önemli fark meydana gelmemiştir.

3.2. Su Emme ve Boşluk Oranı

Sertleşmiş beton numunelerinin su emme ve boşluk oranlarının belirlenmesi için 28 günlük 100×100×100 mm'lik küp numuneler kullanılmıştır. Numunelerin etüv kurusu ağırlıkları ve suya doygun ağırlıkları belirlenerek Tablo 7'deki değerler elde edilmiştir.

Tablo 7. Su emme ve boşluk oranı deney sonuçları

Karışım No	Su Emme Oranı, %	Boşluk Oranı, %	Karışım No	Su Emme Oranı, %	Boşluk Oranı, %
M0	1,93	4,81	K0	2,06	5,09
M1	1,95	4,82	K1	1,76	4,32
M2	1,39	3,47	K2	1,43	3,51
M3	1,15	2,91	K3	1,26	3,16
M4	1,68	4,23	K4	1,89	4,63
M5	1,36	3,42	K5	1,50	3,71



Şekil 7. Su emme –boşluk oranı değişimi

Metagabro tipi agrega ile üretilen YDB'lerin su emme oranları %1,15-1,95, boşluk oranları %2,91-4,82 arasında elde edilmiştir. Kalker tipi agregalarla ise su emme oranları %1,26-2,06, boşluk oranları %3,16-5,09 arasındadır. Hem kalker hem metagabro agrega grubu ile üretilen YDB'larda mineral katkı kullanımı su emme ve boşluk oranı değerlerini düşürmüştür (Şekil 7). Sugözü uçucu külü ile üretilen betonların su emme ve boşluk oranı Çatalağzı külü ile üretilen betonlardan daha düşük değerlerdedir. Küllerin fiziksel özellikleri harçların boşluk yapısını da etkilemektedir. Her iki kül içinde silis dumanı ilavesi ile boşluk oranları dolayısıyla su emme değerleri düşmüştür. Uçucu kül tanelerinden daha ince olan silis dumanı ara boşlukları doldurarak daha sıkı bir yapı oluşturduğu öngörülmektedir. Benzer şekilde Delikurt ve Sevim [24] uçucu küllü yüksek dayanımlı beton ürettikleri çalışmalarında %10 uçucu kül içeren karışımlarda kül içermeyen kontrol numunelerine göre daha düşük su emme ve boşluk oranı değerleri elde etmişlerdir.

3.3. Basınç Dayanımı ve Ultrases Geçiş Hızı

Basınç dayanımının tayini için 100×100×100 mm'lik küp numuneler üretilmiştir. Numunelerin 28 günlük basınç

dayanımları belirlenmiştir. Numuneler, TS EN 12390-4 [25] standardına uygun olarak beton presinde basınç dayanımının tayini için deneye tabi tutulmuşlardır. TS EN 12504-4 [26] standardına göre betonun içerisine ses üstü dalgaları gönderilerek betonun bir yüzeyinden diğerine ultrases geçiş süresi hesaplanmıştır. Tahribatsız yöntem olan ultrases dalga

hızı ile betonun basınç dayanımı ve boşluk oranları arasında ilişki elde edilebilmektedir (Şekil 8). Mineral katkılı farklı agregalar ile üretilen betonlara ait basınç dayanımları ve ultrases hızı deney sonuçları Tablo 8’de sunulmuştur.

Tablo 8. Basınç dayanımı ve ultrases hızı deney sonuçları

Karışım No	Ultrases Hızı, m/s (DKY)	Ultrases Hızı, m/s (Kuru)	Basınç Dayanımı, MPa	Karışım No	Ultrases Hızı, m/s (DKY)	Ultrases Hızı, m/s (Kuru)	Basınç Dayanımı, MPa
M0	5154	4926	60,1	K0	5208	5025	62,5
M1	5181	4938	65,3	K1	5291	5102	67,8
M2	5208	5051	70,5	K2	5335	5163	80,6
M3	5263	5076	76,7	K3	5272	5003	81,4
M4	5128	4820	59,4	K4	5091	4878	62,3
M5	5177	4904	67,2	K5	5226	4908	70,2

Deneyler sonucunda metagabro tipi agrega ile üretilen YDB’ların DKY ultrases hızları 5128-5263 m/s, kuru ultrases hızları 4820-5076 m/s arasındadır. Kalker agregası ile DKY ultrases hızları 5091-5335 m/s, kuru ultrases hızları 4878-5163 m/s arasındadır. Her iki agrega grubu YDB’larda ultrases hızı değişimi kontrol karışımı ile mineral katkılı harçlardaki değişim boşluk oranlarındaki değişim ile anlamlıdır. Metagabro tipi agregalarda Sugözü uçucu külü+Silis Dumanı katkılı harçlarda boşluk oranı %2,91 ile en düşük değerde iken DKY ultrases 5263 m/s ile en yüksek değerdedir. Benzer şekilde kalker tipi agregalarla üretilen YDB’larda boşluk oranı %3,16 ile en düşük değerde iken DKY ultrases 5272 m/s ile en yüksek değerdedir.

Ultrases geçiş hızı ile betonun kalitesi Feldman [27] tarafından Tablo 9’da aşağıdaki gibi ilişkilendirilmiştir. Tablo 9 incelendiğinde, bu çalışmada kireçtaşı ve metagabro agregaları ile üretilen tüm yüksek dayanımlı betonların mükemmel kalitede olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, metagabro agregalarının yüksek kaliteye sahip beton üretiminde kullanılabileceği söylenebilir.

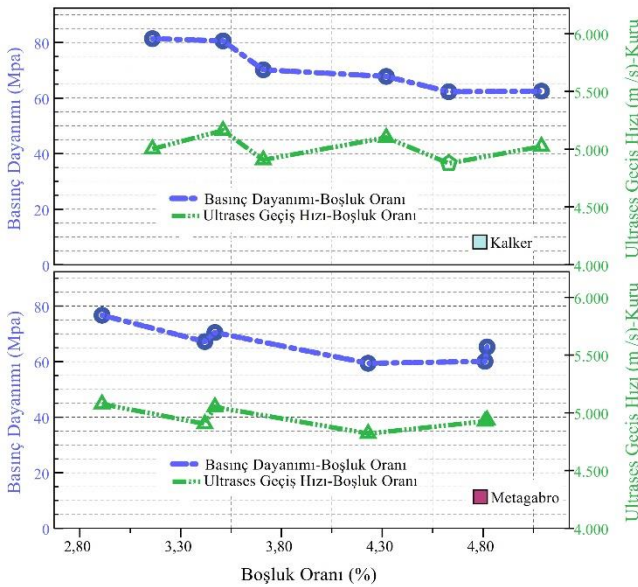
Tablo 9. Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesi ilişkisi, Feldman [27]

Ultrases Geçiş Hızı, m/s	Kalite
>4500	Mükemmel
3600-4500	İyi
3000-3600	Şüpheli
2100-3000	Zayıf
<2100	Çok Zayıf

Uçucu kül, silis dumanı ve uçucu kül ile birlikte silis dumanı içeriği yüksek dayanımlı betonların ultrases geçiş hızlarını artırmıştır. Bunun nedeni hem kimyasal olarak uçucu kül ve silis dumanının pozolanik reaksiyonu ile hem de özellikle silis dumanının tanecik boyutunun çimentoya göre çok küçük olması nedeniyle beton içerisindeki boşlukları doldurması ile fiziksel olarak açıklanabilir [28,29,30].

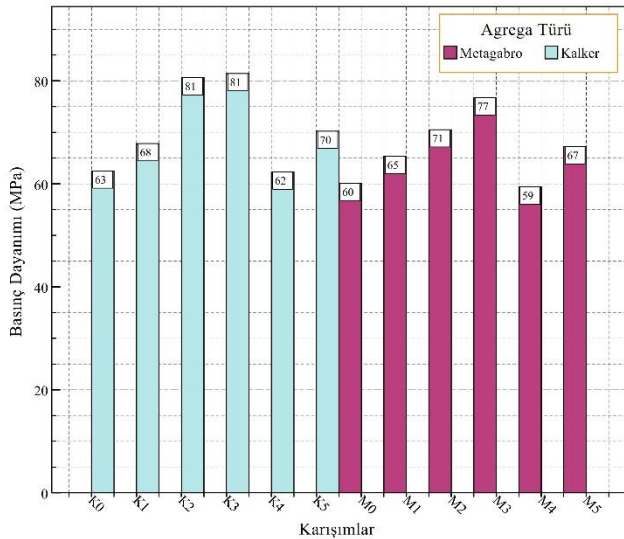
Metagabro tipi agregalarla üretilen betonların basınç dayanımlarında kontrol grubu 60,1 MPa iken mineral katkılı YDB’lar 59,4-76,7 MPa arasındadır (Şekil 9). En yüksek dayanım Sugözü uçucu külünün silis dumanı ile karışımı olan M3 karışımında 76,7 MPa olarak gerçekleşmiştir. Yoğunluğu Çatalağzı uçucu külünden daha yüksek olan Sugözü uçucu külü ile kül arasına iyi bir dolgu olan silis dumanı daha yoğun hamur kıvamı oluşturarak dayanımın gelişmesine yol açmıştır.

Kalker tipi agregalar ile YDB’larda kontrol grubu 62,5 MPa iken mineral katkılı YDB’lar 62,3-81,4 MPa arasındadır



Şekil 8. Basınç dayanımı-ultrases hızlarının boşluk oranı ile değişimi

(Şekil 9). En yüksek dayanım Sugözü uçucu külü ile silis dumanı karışımında K3 karışımında 81,4 MPa olarak elde edilmiştir. Yine metagabro tipi agregalı betonlarda olduğu gibi dayanım için hamur yapısı mineral katkıların fiziksel özelliklerine bağlı olarak karışım sonucu daha iyi oluşmuştur. Genel olarak metagabro tipi agregaların yoğunluklarının kalker tipi agregalardan yüksek olmasına rağmen basınç dayanım değerlerinde oluşan düşük değerler agrega çimento hamuru ara yüzey yapısının kalker tipi agregalarda daha iyi oluşmasıdır.



Şekil 9. Karışım gruplarına ait basınç dayanım değerleri

Benzer sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarda da görülmüştür. Thomas ve ark. [31] çimento yerine F sınıfı uçucu kül, silis dumanı ve silis dumanı ile birlikte F sınıfı uçucu külü ayrı ayrı ikame ederek beton karışımları üretmişlerdir. Uçucu kül ile birlikte silis dumanının çimento yerine ikame edildiği betonlarda 7. günden itibaren kontrol betonlarına kıyasla daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Ayrıca, ileri yaşlarda (90 gün ve sonrası) en yüksek basınç mukavemetine de uçucu kül ve silis dumanının beraber kullanıldığı betonlarda ulaşılmıştır. Erdem ve Kırcı [32] dört farklı bağlayıcı dozajı ile yüksek dayanımlı betonlar üretmişlerdir. Araştırmacılar, çimento yerine ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranlarında silis dumanı ikame ederek silis dumanının yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımları üzerine etkilerini araştırmışlardır. En yüksek basınç dayanımlarına %10 ve %15 silis dumanı ile üretilen betonlarda ulaşılmıştır. Ayrıca, çalışmada silis dumanından daha düşük dayanım aktivite indeksine sahip F ve C sınıfı uçucu küller ile silis dumanı beraber kullanılarak betonlar üretilmiştir. Deney sonuçları %5 uçucu kül ile birlikte %5 silis dumanı (toplamda %10 puzolan içeriği) ile üretilen betonların 28 günlük basınç dayanımlarının %10 silis dumanı ile üretilenlere göre genellikle daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada da uçucu kül ikame edilen betonlarda silis dumanı ikame edilen betonlara göre daha düşük dayanım elde edilmesine rağmen, bu iki puzolanın beraber kullanıldığı betonlarda sadece silis dumanı ile üretilen betonlardan daha yüksek basınç dayanımı elde edilmesi mikro yapıdaki doluluk ile açıklanabilir. Çimento,

uçucu kül ve silis dumanı ile üretilen betonlardaki bağlayıcı gradasyonunun daha iyi dağılımı ile bağlayıcı olarak çimento ve silis dumanı ile üretilen betonlardan daha kompakt bir pasta elde edilmiştir. Zhao ve Sun [33] düşük su bağlayıcı oranı ile hazırlanan çimento pastalarının makro boşluklarının silis dumanı ile birlikte azaldığını ancak uçucu kül içeriği ile birlikte boşluk yapısının gelişmediğini rapor etmişlerdir. Bununla birlikte silis dumanı ve uçucu külün birlikte kullanıldığı çimento pastalarının boşluk yapılarının sadece silis dumanı ile üretilen pastalar ile benzer olduğunu belirtmişlerdir.

Yüksek dayanımlı betonlarda uçucu kül ve silis dumanı içeriği ile birlikte görülen basınç dayanımı artışının ana nedenlerinden biri bu puzolanlarda bulunan amorf yapıdaki SiO_2 ile bir çimento hidratasyon ürünü olan Ca(OH)_2 'nin reaksiyonu sonucu ikincil C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jellerinin oluşmasıdır [24,34,35]. Bu iki puzolan içerisinde bulunan amorf SiO_2 miktarı ile puzolanların farklı tanecek boyutlarına ve inceliğe sahip oluşu, yüksek dayanımlı betonlardaki dayanım artışının puzolan türüne göre farklılık göstermesine neden olmuştur.

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

- Kalker agregası ile üretilen kontrol karışımları metagabro ile üretilen kontrol karışımların basınç dayanımlarından %4 daha fazladır. Puzolan içeren karışımlarda da kalker ile üretilen karışımların basınç dayanımları, metagabro ile üretilenlere göre %4 ile %15 oranları arasında daha yüksektir.
- UK-1+SD katkılı metagabro veya kalker agregaları ile üretilen betonların basınç dayanımı kontrol karışımlarından (M0 veya K0) yaklaşık %28 daha fazladır.
- En yüksek dayanım veren M3 karışımının boşluk oranı kontrol karışımı M0'in boşluk oranından %40 daha düşüktür. Kalker tipi agregalı karışımlarda ise K3'ün boşluk oranı K0'dan %39 daha düşüktür.
- K3 grubu karışımların boşluk oranı %3,16 iken, M3 grubu karışımların 2,91'dir. Az da olsa K3 yüksek boşluk oranına sahip olmasına rağmen M3 den yüksek dayanım vermesi agrega-çimento hamuru ara yüzey yapısı ile açıklanabilir.
- Kalker tipi agregalar ile üretilen beton karışımların (K) ultrases geçiş hızları, metagabro tipi ile üretilen karışımların (M) ultrases hızlarından daha yüksektir. Bu sonuçlar boşluk oranları ile basınç dayanımları arasındaki değişim ile uyumludur.
- Tüm karışımlarda benzer gradasyonda kullanılan metagabro agregalarının ortalama yoğunluğu $2,74 \text{ g/cm}^3$, kalker agregalarının ortalama yoğunluğu ise $2,73 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Bu nedenle her iki grup agrega ile üretilen karışımlarda da (K ve M) birim ağırlık ve yoğunluklar birbirine yakın değerlerdedir.
- Genel olarak hem metagabro hem kalker agregası yüksek dayanımlı beton üretimi için uygundur ancak kalker agregası ile daha yüksek dayanım elde edilebildiği için çimento maliyeti açısından da

kalker türü agrega yüksek dayanımlı beton üretimi için metagabro agregasına göre daha uygundur.

- Ayrıca mineral katkı olarak farklı boyutlara sahip silis dumanı ve uçucu külün bir arada kullanımı daha iyi dolgu özelliği sağladığı için bu katkıların ayrı ayrı kullanımına göre daha iyi performans elde edilmesine yol açmıştır.
- Çalışmanın gelecekteki aşamalarında kapsamı genişletilerek mineral katkı oranları değişimi incelenip yüksek sıcaklık ve SEM analizi yapılarak yapıdaki değişimin dayanım deneyleri ile bağlantısı daha net ortaya konabilir.


KAYNAKÇA

- [1] Miller, S.A., Horvath, A., Monteiro, P.J.M., Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20%", *Environ. Res. Lett.*, 11 (7), p. 7, 2016.
- [2] Aprianti, E., "A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production—a review part II", *Journal of cleaner production*, 142, 4178-4194, 2017.
- [3] Aitcin P.C., Mehta P.K., "Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high strength concrete", *ACI Mater J*, 87(2):103–7, 1990.
- [4] Beshr H., Almusallam A.A., Maslehuddin M., "Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete", *Construction and Building Materials*, 17:97–103, 2003.
- [5] Ezeldin A.S, Aitcin P.C., "Effect of coarse aggregate on the behaviour of normal and high strength concretes", *Cement Concrete Aggr*, 13(2):121–4, 1991.
- [6] Kılıç, A., Atış, C. D., Teymen, A., Karahan, O., Özcan, F., Bilim, C., & Özdemir, M., "The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete", *Cement and Concrete Composites*, 30(4), 290-296, 2008.
- [7] Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., & Jullien, A., "Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation", *Journal of Cleaner Production*, 18(5), 478-485, 2010.
- [8] Assi, L., Carter K., (Eddie) Deaver E., Anay R., Ziehl P., "Sustainable concrete: Building a greener future", *Journal of Cleaner Production*, 198: 1641-1651, 2018.
- [9] Oner, A., Akyuz, S., & Yildiz, R., "An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete", *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1165-1171, 2005.
- [10] Shaikuthali, S. A., Mannan, M. A., Dawood, E. T., Teo, D. C. L., Ahmadi, R., & Ismail, I., "Workability and compressive strength properties of normal weight concrete using high dosage of fly ash as cement replacement", *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 4(1), 26, 2019.
- [11] Toutanji, H., Delatte, N., Aggoun, S., Duval, R., & Danson, A., "Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete", *Cement and Concrete Research*, 34(2), 311-319, 2004.
- [12] Khan, M., Rehman, A., & Ali, M., "Efficiency of silica-fume content in plain and natural fiber reinforced concrete for concrete road", *Construction and Building Materials*, 244, 118382, 2020.
- [13] Elahi, A., Basheer, P. A. M., Nanukuttan, S. V., & Khan, Q. U. Z., "Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials", *Construction and Building Materials*, 24(3), 292-299, 2010.
- [14] Wang, Y., & Suraneni, P., "Experimental methods to determine the feasibility of steel slags as supplementary cementitious materials", *Construction and Building Materials*, 204, 458-467, 2019.
- [15] Chouksey, A., Dev, N., & Kumari, S., "Review Paper on Utilization Potential of Rice Husk Ash as Supplementary Cementitious Material. In Sustainable", *Construction and Building Materials* (pp. 673-684). Springer, Singapore, 2019.
- [16] Msinjili, N. S., Schmidt, W., Rogge, A., & Kühne, H. C., "Rice husk ash as a sustainable supplementary cementitious material for improved concrete properties", *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 11(4), 417-425, 2019.
- [17] Badogiannis, E., Kakali, G., & Tsivilis, S., "Metakaolin as supplementary cementitious material", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 81(2), 457-462, 2005.
- [18] Saridemir, M., Severcan, M. H., Ciflikli, M., Celikten, S., Ozcan, F., & Atis, C. D., "The influence of elevated temperature on strength and microstructure of high strength concrete containing ground pumice and metakaolin", *Construction and Building Materials*, 124, 244-257, 2016.
- [19] TS EN 197-1. , Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [20] ASTM C618, Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, Annual Book of ASTM Standarts, 2012.
- [21] TS EN 934-2+A1, Kimyasal katkılar - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [22] TS EN 1008, Beton karma suyu- Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003.
- [23] TS EN 12390-7, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2019.
- [24] Delikurt, B. C., Sevim, U. K., "Sugözü uçucu külünün betonun mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi", *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(1), 47-58, 2015.
- [25] TS EN 12390-4, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 4: Basınç dayanımı - Deney makinelerinin özellikleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2019.
- [26] TS EN 12504-4, Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2004.

- [27] Feldman, R. F., *Non-Destructive Testing of Concrete*, CBD-187, National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, 1977.
- [28] Savva, A. E., "High-strength concrete: mechanical and elastic properties of fly ash and silica fume containing mixtures". In *Proc. Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolan in Concrete* (pp. 125-139), 2001.
- [29] Hassan, K. E., Cabrera, J. G., & Maliehe, R. S., "The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete", *Cement and concrete composites*, 22(4), 267-271, 2000.
- [30] Atabey, İ.İ., Yurt, Ü., DüNDAR, B., "Farklı mineral katkı kullanımının beton dayanım özellikleri üzerine etkisinin araştırılması", *Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu, Düzce*, 2017.
- [31] Thomas, M. D. A., Shehata, M. H., Shashiprakash, S. G., Hopkins, D. S., & Cail, K., "Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete", *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1207-1214, 1999.
- [32] Erdem, T. K., & Kırca, Ö., "Use of binary and ternary blends in high strength concrete", *Construction and Building Materials*, 22(7), 1477-1483, 2008.
- [33] Zhao, S., & Sun, W., "Effect of silica fume and fly ash on pore structures of blended pastes at low water to binder ratios", *Advances in Cement Research*, 27(9), 506-514, 2015.
- [34] Hanehara, S., Tomosawa, F., Kobayakawa, M., & Hwang, K., "Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste", *Cement and Concrete Research*, 31(1), 31-39, 2001.
- [35] Qing, Y. E., Zenan, Z., Li, S., & Rongshen, C., "A comparative study on the pozzolanic activity between nano-SiO₂ and silica fume", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 21(3), 153-157, 2006.

Implementation of a Vibration Absorbers to Euler-Bernoulli Beam and Dynamic Analysis of Moving Car

*Mehmet Akif Koç

*Sakarya Applied Sciences University, Technology Faculty Mechatronics Engineering 

Research Paper

Arrival Date: 20.12.2019

Accepted Date: 27.06.2020

Abstract

In this study, the dynamic analysis of Euler-Bernoulli bridge beam, single-degree of freedom moving vehicle and vibration absorber is discussed according to vehicle and bridge dynamics. The equations of motion entire system representing the physical model of the system are obtained using the Lagrange function. Then the vibration equation of vehicle and bridge beam which attached vibration absorber has been solved numerically with a special program written in computer software. The effect of the basic parameters such as frequency (f_i), damping (c) coefficient, mass (m), mass ratio (α) and location of the vibration absorber on the bridge are examined in detail in terms of vehicle and bridge dynamics.

Keywords: Vibration absorbers, Moving Car, Mass ratio, Absorber Location.

1. INTRODUCTION

Dynamic analysis of structures effect of moving car are important in science and have been studied over a century by scientist [1,2]. The first studies related to moving load studies are those in which moving load is considered as concentrated load. Since these studies are mainly focused on bridge dynamics rather than vehicle dynamics, this acceptance is not a problem in terms of bridge engineering. However, if the vehicle dynamics are to be analysed in addition to the bridge dynamics, the adoption of the concentrated load is insufficient and the studies in this field are limited [3]. With the passing of vehicles such as heavy tonnage trains on flexible structures such as bridges, this issue was examined by mechanical engineers in terms of vehicle dynamics. If vehicle dynamics is to be investigated in addition to bridge dynamics, then vehicle-bridge interaction (VBI) analysis is required. In this field, some of numerical studies [4–8] are important for the dynamics of the bridge effect of different conditions and boundary cases. Taking into account inertial impact of the moving loads the subject have been studied using analytical and numerical by finite element method (FEM) [9–11]. Dynamic analysis of Euler-Bernoulli beam and control have been studied by In the studies performed, it has been shown that the PTMD placed in the anti-mode part of the mode shapes of the bridge beam is highly effective in damping the vibrations.

The biggest problem of using vibration absorbers in flexible structures, the impact frequency of the moving car is variable and when the car velocity changed. The others, the moving vehicles on the bridge have different dynamic characteristics. In this study, in order to dampen the vibrations of Euler-Bernoulli beam under the influence of

moving carriage, the idea of placing the anti-nodes of the beam used in previous studies[12] as a vibration absorber was developed. For this purpose, the idea of placing a vibration absorber at the joint points corresponding to more than one mode shape of the bridge beam was used. Vibrations occurring in any structural system can be considered as the sum of multiple vibration modes that make up this structural system. Therefore, in this study, the vibrations of the first four modes of the bridge beam are considered. For this purpose, a vibration absorber is placed in the antinode section (bridge half distance) corresponding to the first mode of the bridge beam. A second vibration absorber is located in the first quarter and last quarter of the bridge distance, which are the anti-node portions of the second mode of the bridge beam. In addition, the effect of damped and non-damped vibration absorber on the bridge dynamics and the effect of the position of the vibration absorber on the bridge dynamics are also examined. In addition, the effects of the mass ratio parameter defined by the ratio of the mass of the absorber and the bridge beam to the vehicle and the bridge dynamics are shown. In conclusion, this study proved that the use of vibration absorber can be effective in damping vibrations caused by forces caused by moving mass in flexible structures such as bridges.

2. MATHEMATICAL MODELLING

2.1. Governing of equation of motion vehicle-bridge absorber interaction system

In order to damping the disturbing vibrations between the moving vehicle and the flexible structure, the physical model given in Figure 1 is discussed. The parameters m , c , k on this

*Corresponding Author: Sakarya Applied Sciences University, Technology Faculty Mechatronics Engineering

model are respectively the mass of the moving vehicle, the damping value and the spring coefficient. The parameters and, respectively, are the mass and spring constants of the damper suspended on the bridge beam. Besides, $w_b(x, t)$ parameter is the transverse deformation of the bridge at point x at time t .

For the system given by Figure 1, the kinetic and potential energies are given by Eq.(1-2) respectively.

$$E_k = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} &\int_0^L \mu [\dot{w}_b^2(x, t)] dx \\ &+ m \dot{y}^2(t) + m_1 \dot{y}_1^2(t) \\ &+ m_2 \dot{y}_2^2(t) + m_3 \dot{y}_3^2(t) \end{aligned} \right\}, \tag{1}$$

$$E_p = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} &\int_0^L EI w_b''^2(x, t) dx \\ &+ k [y(t) - w_b(\xi(t), t)]^2 H(x, \xi(t)) \\ &+ k_1 [y_1(t) - w_b(L/4, t)]^2 \\ &+ k_2 [y_2(t) - w_b(L/2, t)]^2 \\ &+ k_3 [y_3(t) - w_b(3L/4, t)]^2 \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

where μ and EI , refer to the mass of the unit length and flexural rigidity of the bridge beam, respectively. For any point x on the bridge beam and any time t , transverse deformation is written by Galerkin function as follows:

$$\begin{aligned} w_b(x, t) &= \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) \eta_{bi}(t), \\ \dot{w}_b(x, t) &= \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) \dot{\eta}_{bi}(t), \\ w_b''(x, t) &= \sum_{i=1}^n \varphi_i''(x) \eta_{bi}(t), \\ \varphi_i(x) &= \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right), \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \tag{3}$$

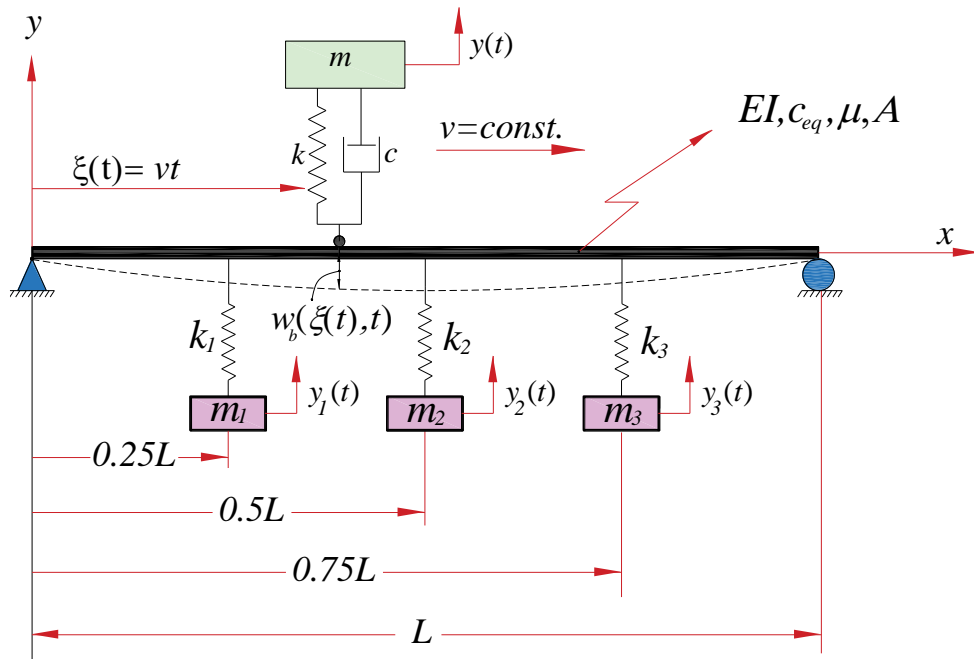


Figure 1. Model of Euler-Bernoulli Bridge beam with attached PTMDs and subjected to moving vehicle.

where η_{bi} is the i -th time dependent generalized nodal coordinate, φ_i is i -th mode shape function. The orthogonality of the modes can be expressed as:

$$\int_0^L \mu \varphi_i(x) \varphi_j(x) dx = N_i \delta_{ij},$$

$$\int_0^L EI \varphi_i''(x) \varphi_j''(x) dx = \Pi_i \delta_{ij},$$
(4)

In Eq. (4) δ_{ij} ($i, j=1,2,\dots,n$) are the Kronecker delta function. For the vehicle- bridge system the Rayleigh's dissipation function can be expressed as below:

$$D = \frac{1}{2} \left\{ \int_0^L \left\{ c_{eq} \dot{w}_b^2(x,t) + c[\dot{y}(t) - \dot{w}_b(\xi(t),t)]^2 H(x - \xi(t)) \right\} dx \right\}$$
(5)

In Eq. (5) c_{eq} is the equivalent damping coefficient of bridge girder. By using the Galerkin function given by equation (3), the equations of motion of the VBI system are obtained by Lagrange equation. Accordingly, the equation of motion for vehicle body vertical vibrations can be obtained by:

$$\ddot{y} = \{-c[\dot{y}(t) - \dot{w}_b(x,t)] - k[y(t) - w_b(x,t)]\} \frac{1}{m}$$
(6a)

And first absorber vertical acceleration is governed by:

$$\ddot{y}_1 = \{-k_1[y(t) - w_b(L/4,t)]\} \frac{1}{m_1}$$
(6b)

The equation of motion of second vibration absorber is given by:

$$\ddot{y}_2 = \{-k_2[y(t) - w_b(L/2,t)]\} \frac{1}{m_2}$$
(6c)

And finally the third absorber motion equation:

$$\ddot{y}_3 = \{-k_3[y(t) - w_b(3L/4,t)]\} \frac{1}{m_3}$$
(6d)

the equation of motion representing the bridge dynamics is written as follows:

$$N_i \ddot{\eta}_i(t) + c_{eq} \varphi_i^2(x) \dot{\eta}_i(t) + \Pi_i \eta_i(t) + \Lambda \varphi_i(\xi_1(t)) \left\{ \begin{array}{l} f_c + c[\dot{w}_b(\xi(t),t) \Lambda_1 - \dot{y}(t)] \\ + k[w(\xi(t),t) \Lambda - y(t)] \end{array} \right\}$$

$$+ k_1[w_b(L/4,t) - y_1(t)] + k_2[w_b(L/2,t) - y_2(t)] + k_3[w_b(3L/4,t) - y_3(t)] = 0 \quad i = 1,2,3,4.$$
(7)

where A is:

$$L = \begin{cases} 1, & \text{for } 0 \leq t < t_1 \\ 0 & \text{elsewhere,} \end{cases}$$
(8)

2.2. Solution of equation of motion entire system with state-space form and using fourth-order Runge-Kutta method

In this study fourth order Runge-Kutta algorithm has been used for the equation of motion entire system given by

Eqs.(6-7). The bridge dynamic is represented by second order differential equation and in this study, the first four modes are used for calculate to dynamic response of bridge beam. For this reason, four second order differential equations have been obtained for bridge dynamics. These four second order differential equations are reduced to eight first order differential equations using appropriate state constants. Similarly, vehicle dynamics is expressed by two first order differential equations. Vibration absorbers are represented by six first order differential equations. As a result, a total of sixteen first order differential equations were solved with a special program prepared in computer. Detailed information about the solution algorithm is given by [13–16] studies.

3. NUMERICAL ANALYSIS

Figure 2 shows four different VBI cases. In case 1, the vibration absorber which contain only spring and mass is attached the midpoint of the bridge. The frequency of this vibration absorber is set to the first mode frequency of the bridge beam ($f_1 = 0.2108$ Hz). In the case 2, a damper was added to the absorber placed at the midpoint of the bridge. The parameters of the damper given by Table 1. In case 3, the first two modes of the bridge are taken into account and placed on three absorber bridges ($f_1=0.2108$ and $f_2=0.8432$ Hz). In Case 4, no dampers were used to compare other cases. The vehicle and bridge parameters used in this study given by study [16].

Table 1. Damping properties of the vibration absorber used Case 2.

Parameters	Value
Critical damping	26476.46 Nsm ⁻¹
Damping ratio	0.377
Damped natural frequency	0.195 Hz

In Figures 3 and 4 comparisons of the matrices constituted from the vectors of displacements and accelerations depending on the position and the vehicle speed on the bridge are shown, respectively. The Frobenius norm used for comparison of the matrices is expressed as given:

$$\|A\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^{m_A} \sum_{j=1}^{n_A} |A_{ij}|^2}$$
(9)

In Eq. (9), A is any matrix with the dimension of $m_A \times n_A$, and $|A_{ij}|$ is value of the element at the i th row and j th column. Figures 3a-d are for the displacements, and Figures 4a-d are for the accelerations of the bridge for the cases of the usage of the cases 1, 2, 3 and 4. A comparison of the Figures 3 and 4 is briefly given in Table 2.

For the four cases, the displacements and accelerations of the vehicle are presented in Figures 5a and b depending on the velocity of the vehicle between 1 and 90 m/s with an increment of 1.2 m/s. In all the cases the absorbers are tuned to the fundamental frequency of the bridge which is

$f_1=0.2108$ Hz. except for case 3 the absorbers at the locations of 0.25L and 0.75 L are tuned to the frequency of the second mode of the bridge that is $f_2=0.8432$ Hz. As can be seen from Figure 5a the maximum displacement is occurred at the velocity of 19 m/s as 19.9 mm in the case 4 that there is no absorber, while, the maximum is 16.8 mm at 11 m/s in the case 1.

Moreover, for the case 2, it is 17.5 mm at 14 m/s, and for 3 it is 17.3 mm at 12 m/s. In Figure 4, the maximum acceleration is 0.2248 for case 4, and 0.212 for the case 1, 0.2046 for case 2, and for the case 3 it is 0.1298 m/s^2 . Generally, the case 3 is the best design both the bridge and the vehicle. In Figures 6a and b, the displacements and accelerations of the vehicle body for a travelling speed of $v=25$ m/s are given. In addition, Table 3 shows a comparison of the maximum displacements and accelerations and their locations of the bridge at which they are occurred. The mass ratio β , is the ratio of the mass of the damper and the mass of the bridge beam, is expressed as below

$$\beta = \frac{m_i}{\mu L} \quad (i=1,2,3) \tag{10}$$

In terms of vehicle and bridge dynamics, the effects of the mass ratios up to 1 percent of the bridge mass are presented in Figures 6a and b. The mass of the unit length of the beam is $\mu=2 \times 10^4$ kg/m and total mass of the bridge beam is $M=2 \times 10^6$ kg for the given length $L=100$ m. Taking the mass ratio $0.0001 \leq \beta \leq 0.01$, with an increment of 2.02×10^{-4} the analysis have been done for a travelling velocity of the vehicle $v=25$ m/s and $\Delta t = 0.01$. The frequencies of the

absorbers at 0.5L and 0.25L and 0.75 L are kept constant using stiffness coefficients of the springs $k_i = 2f_i^2 \pi m_i (i = 1,2)$. Thus, the frequency of the absorber at midpoint is kept as the first natural frequency of the bridge beam. In addition, for the others at 0.25 and 0.75 L the frequencies are kept as the frequency of the second mode. As can be seen from Figure 6a and b the best performance has been achieved for the vehicle and bridge vibrations using the case 3. However for all the cases, when mass ratio (β) is increased the displacements of the vehicle and bridge are generally decreased. Figure 7 shows the effect of the mass ratio on the vertical displacement of the vehicle body and the maximum deflection of the bridge midpoint. As shown in the figures, the maximum displacement amounts decrease as the mass ratio increases.

In this section, for the effect of the position of the one absorber on the bridge, the vehicle and bridge dynamics were studied. The absorber has been placed at the positions on the bridge starting from 5 to 98 m with a 0.8 m increment from the left to the right end of the bridge. For this analysis, the resonance frequency of the absorber is tuned to the fundamental frequency of the bridge beam. In addition, for all the positions of the absorber, analyses were performed using the time step size and constant speed of the vehicle bridge as $\Delta t = 0.01$ s and 25 m/s, respectively. Moreover, for analysing the effect of different absorber stiffness and masses for a particular tuning frequency, the stiffness and the mass are multiplied with a parameter α . With this parameter, the tuning frequencies of the absorber are defined as follows.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha k_2}{\alpha m_2}} \tag{11}$$

Table 2. Frobenius norm value of the bridge for vertical displacement and acceleration.

cases	$\ y_{\max}(x / l, v)\ _F$	Vibration reduction rate (%)	$\ a_{\max}(x / l, v)\ _F$	Vibration reduction rate (%)
1	0.6195	14.29	2.3717	0.67
2	0.6308	12.72	2.2421	6.1
3	0.5875	18.71	0.9968	58.25
4	0.7228	---	2.3878	---

Changing the value of this parameter will not change the natural frequency of the absorber, however, the increase or decrease of this value will cause the absorber to increase or to decrease the stored potential energy in spring and kinetic energy in mass. The effects of the absorber location points on the beam are presented in Figure 8. The minimum displacements have occurred at the midpoint of the beam when the position of the absorber is about 55-60 percent of the beam length for all the values of α . Moreover, the better performance is achieved for the greatest value of the $\alpha=1.8$. This is because the absorption capacity of the absorber is increased. When a realistic application of the passive vibration absorber is considered, a design engineer should

optimize the range of this parameter considering its performance in vibration reduction and adverse effect of additional forces on the bridge beam due to the increased mass of the absorber.

Figures 9a and b show the maximum displacements and accelerations of the vehicle body depending on the position and values of α . The displacement of the bridge forces the vehicle to vibrate due to the interaction between them. When the displacements of the bridge are reduced as in Figure 8, this means that the displacements and the accelerations of the vehicle are reduced at the same time. However, as seen from Figures 9a and b, respectively, the minimum value of vehicle

body displacement is obtained for the absorber location at 52 percent of the bridge length while the minimum value of the body accelerations is obtained for the location of the absorber between 60-65 percent of the length. It is also observed that any increase in the parameter α does not affect

these positions of the absorber. However when the parameter α is increased from 0.6 to 1.8 the displacements of the vehicle is dropped from 0.0158 to 0.0122 m, while the acceleration is dropped from 0.044 to 0.033 m/s².

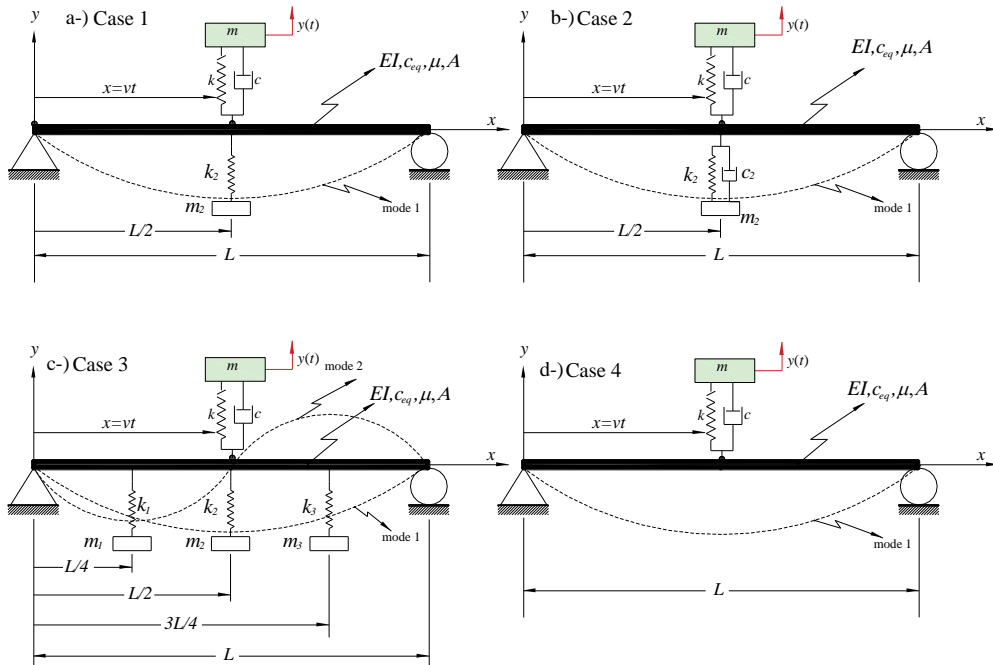


Figure 2. Euler-Bernoulli beam traversed by a moving car (a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3; (d) Case 4.

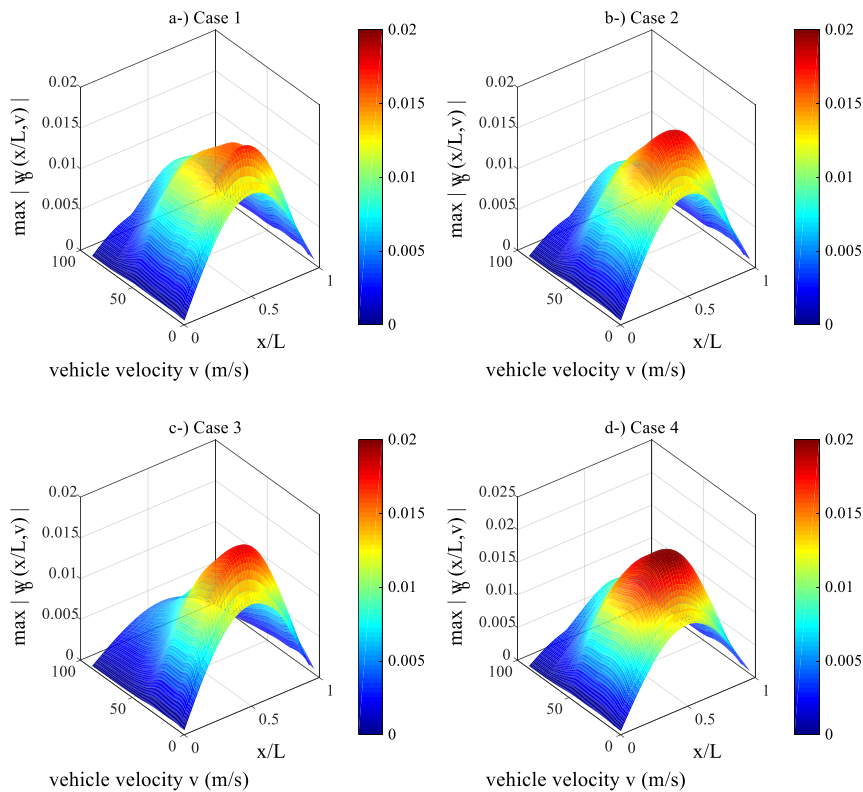


Figure 3. The maximum vertical displacements (m) of the bridge according to vehicle velocity and bridge location (a) case 1; (b) case 2; (c) case 3; (d) case 4.

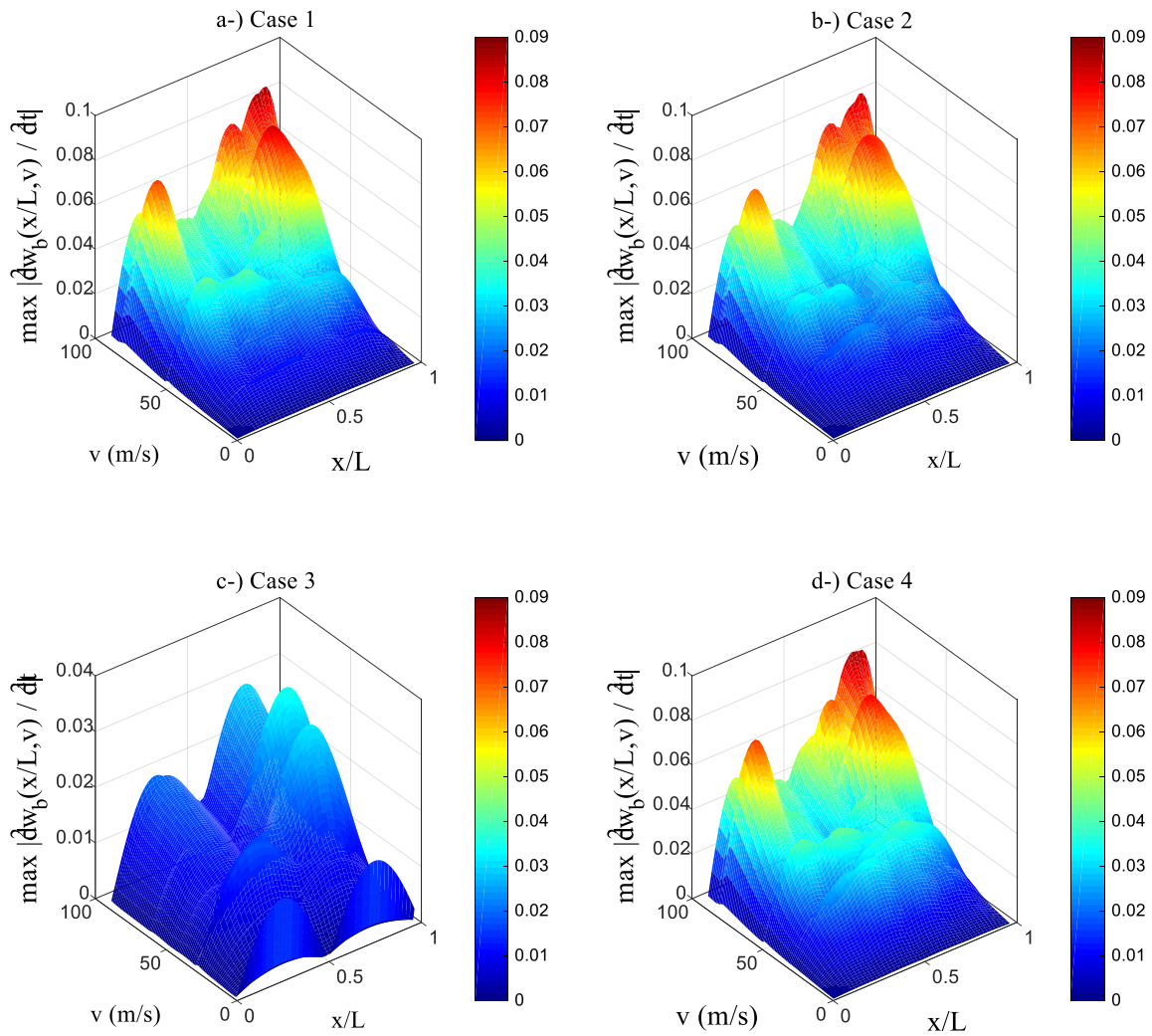


Figure 4. The maximum vertical accelerations (m/s^2) of the bridge according to vehicle velocity and bridge location (a) case 1; (b) case 2; (c) case 3; (d) case 4.

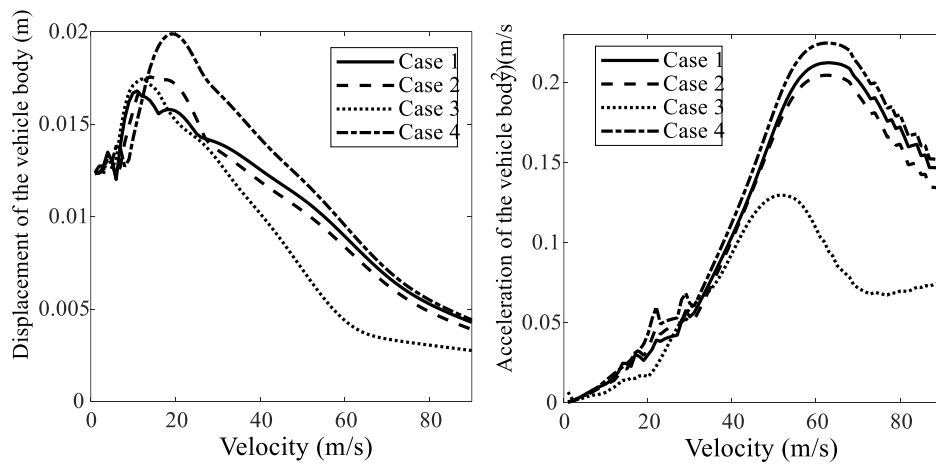


Figure 5. The effect of the absorber upon vehicle dynamic (a) vehicle body displacement (m); (b) vehicle body acceleration (m/s^2)

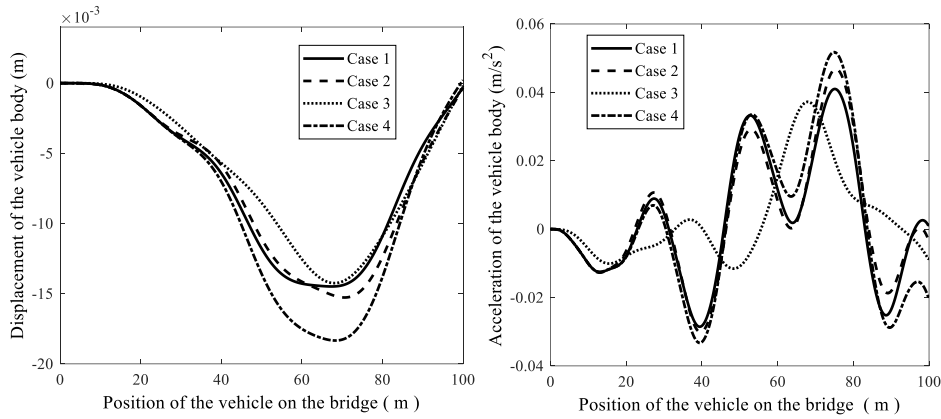


Figure 6. Comparisons of the four different VBA cases for constant vehicle velocity $v=25$ m/s; (a) Vehicle body vertical displacement; (b) vehicle body vertical acceleration (m/s^2).

Table 3. Comparisons of maximum vertical displacements and accelerations for different VBA cases.

cases	Max. disp. (mm)	Location (%)	Vibration reduction rate (%)	Max. acc. (m/s^2)	Location	Vibration reduction rate (%)
1	14.49	67.25	21	0.0407	75.75	21.12
2	15.27	71.5	16.7	0.0468	75.75	9.3
3	14.25	68.25	22.3	0.0372	68	27.9
4	18.34	68.25	---	0.0516	75.25	---

Figures 10a and b show the displacements of the absorber depending of its position on the bridge. For both the displacement and the acceleration of the absorber the maximums are achieved when its location at the 52 percent of the bridge beam length. This is an expected result that where the displacements of the beam are minimum, the displacement, and the acceleration of the absorber mass should be maximum, because the absorber absorbs some portion of the vibration energy of the beam.

Figures 11a-d, respectively, show the maximum displacement of the vehicle body, maximum displacement of the midpoint of the bridge beam, maximum displacements of the absorber and the energies of the absorber, depending on the parameter α and the positions of the absorber on the bridge beam. It is also observed from the Figures that when the absorber possess the maximum energy all the displacements of vehicle and bridge beam are at minimum values for the position of the absorber between 50-55 percent of the bridge beam length.

The total energy of the absorber is defined summing of its kinetic and potential energies $T_a + U_a$ as given below:

$$E_a = T_a + U_a = \frac{1}{2} \left(k_i (y_i - y(L/2, t))^2 + m_i \dot{y}_i^2 \right) \quad (12)$$

$(i = 1, 2, 3),$

In addition, for higher values of the parameter α , the decrease in both displacements of vehicle and bridge beam are more

when compared to the lower values. Figures 12a and b show the accelerations of the vehicle body and absorber mass. It is shown that when the vehicle body accelerates in a higher value, the acceleration of the absorber mass is minimum, and vice versa.

4. CONCLUSIONS

In this study, the effect of vibration absorber placed on Euler-Bernoulli beam on vehicle and bridge dynamics was investigated. For this purpose, the equation of motion between Euler-Bernoulli beam and a single degree of freedom moving vehicle is obtained by using Lagrange equation. As a result, it was found that it is sufficient to take into account the first four modes of the bridge beam for the Galerkin function used to calculate the vibrations of any bridge beam.

The results of the study show that the best case among the three cases is the three absorber model, which is placed in consideration of the first two modes of the bridge beam. This is because in other cases, only the vibrations of the first mode are damped, while in cases 3 the vibrations of the first two modes are damped. The effect of the absorber position on the bridge beam has also been analysed and then it is observed that the reduction effect of the absorber was dependent to the position of the absorber and the velocity of the vehicle. For the same tuning frequency, the effect of the parameter α is very significant in terms of the reduction of the vibrations of both the bridge and vehicle. Any increase in α parameter reduces the responses of the VBI system. The more the parameter α is increased the more the vibrations are reduced.

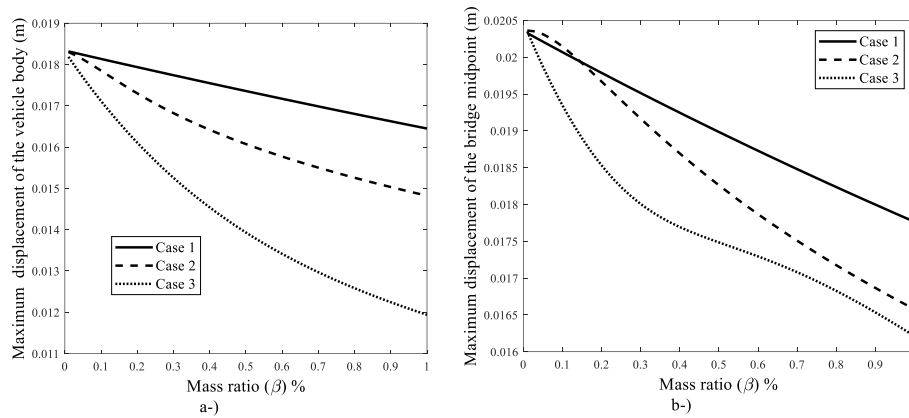


Figure 7. The effect of the mass ratio (β) upon vehicle and bridge dynamics for $v=25$ m/s. (a) vertical displacements of the vehicle body; (b) vertical displacement of the bridge midpoint.

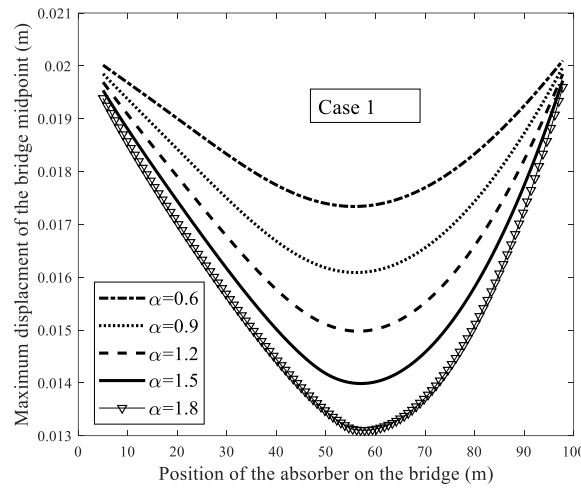


Figure 8. The effect of absorber position on the bridge upon bridge midpoint maximum vertical displacement for different α values and a constant vehicle velocity $v=25$ m/s.

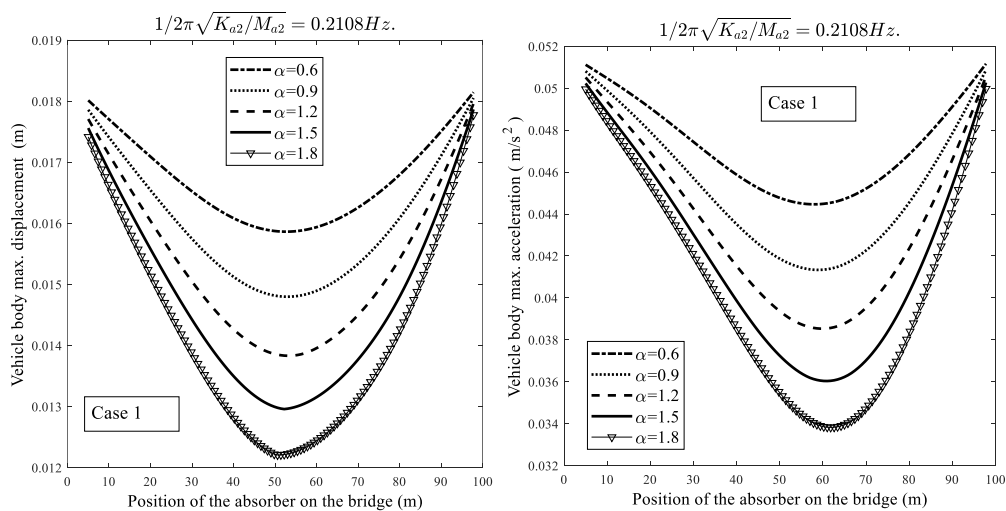


Figure 9. The effect of absorber position on the bridge upon vehicle body dynamics for different α values and $v=25$ m/s, using case 1 (a) vertical maximum displacements of the vehicle body (m); (b) maximum vertical accelerations (m/s^2) of vehicle body.

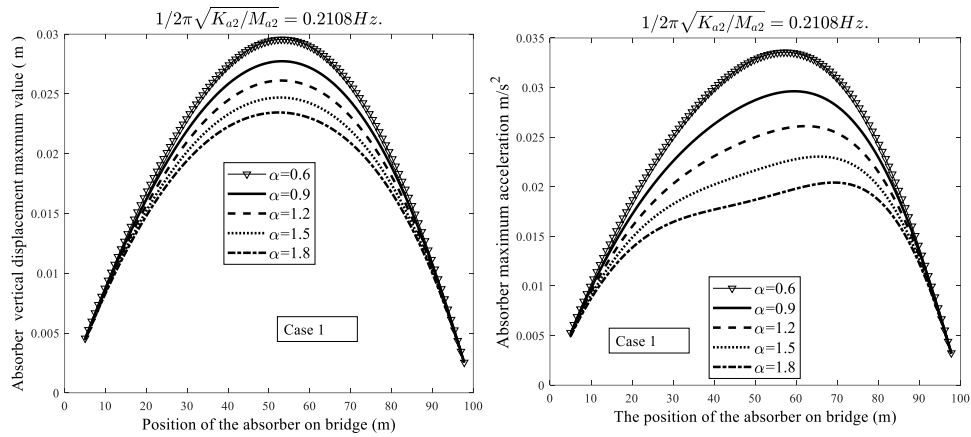


Figure 10. According to absorber position on the bridge for different α values $v=25$ m/s, using case 1. (a) Absorber vertical maximum displacement (m); (b) Absorber vertical acceleration (m/s^2).

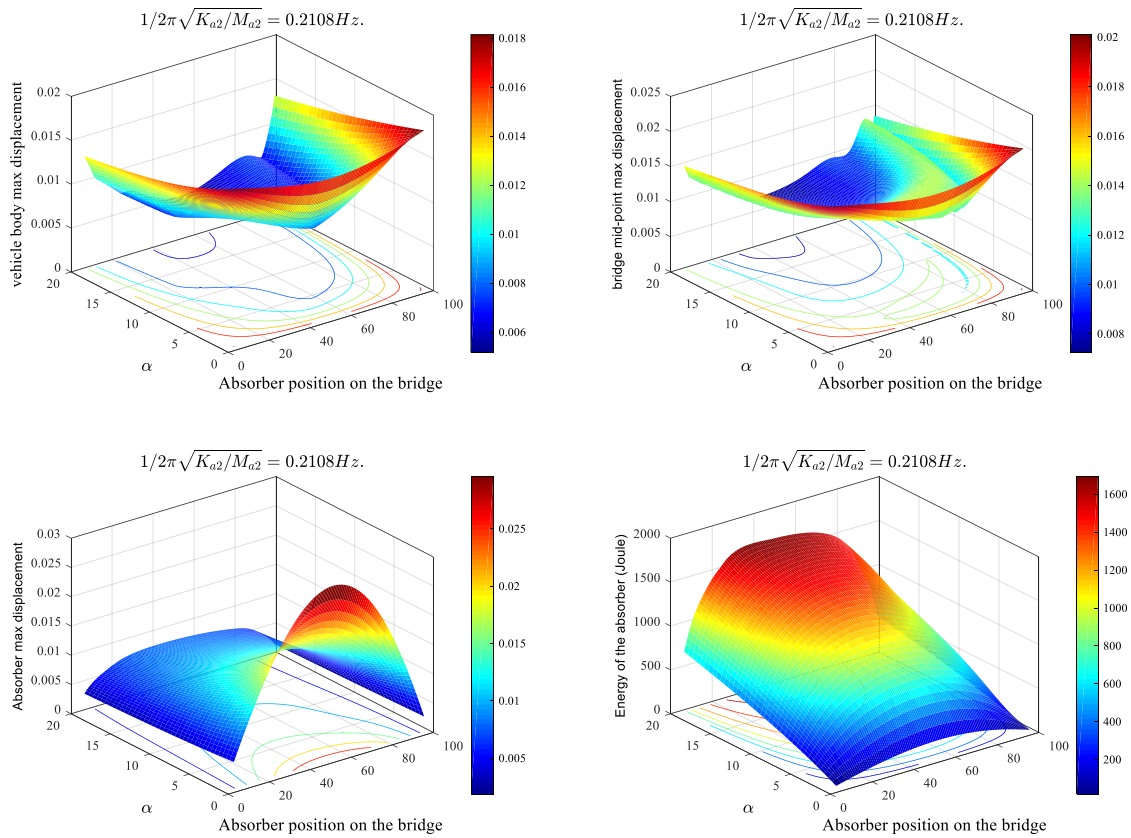


Figure 11. The effect of the parameter α and absorber position on the bridge according to case 1 (a) maximum displacement of the vehicle body (m); (b) Maximum displacement of the bridge midpoint displacement (m); (c) Maximum absorber displacement (m); (d) total energy of the absorber (Joule).

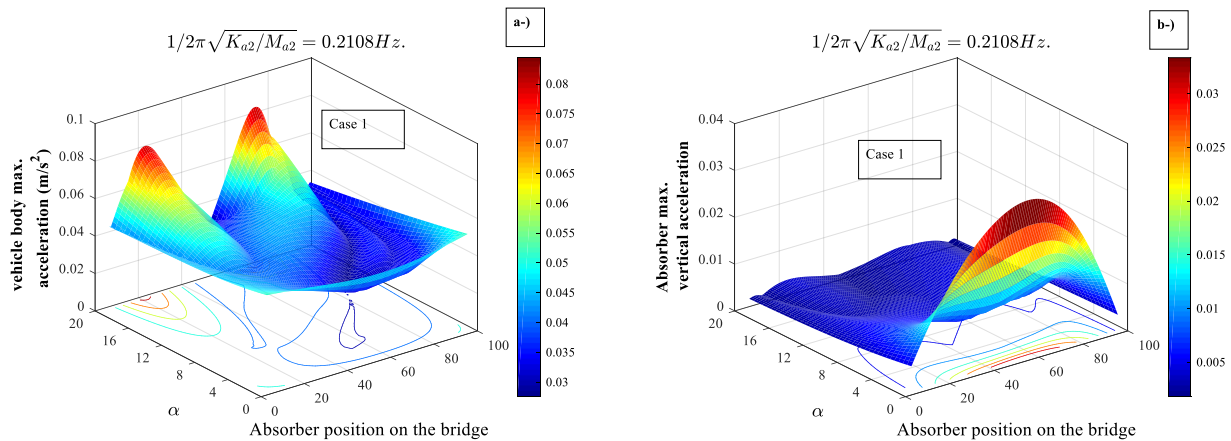


Figure 12. According to parameter α and position of absorber on the bridge for case 1 : (a) maximum acceleration of the vehicle body (m/s^2); (b) maximum absorber acceleration (m/s^2).


REFERENCES

- [1] Y.B. Yang, J.D. Yau, Resonance of high-speed trains moving over a series of simple or continuous beams with non-ballasted tracks, *Eng. Struct.* 143 (2017) 295–305. doi:10.1016/j.engstruct.2017.04.022.
- [2] M.A. Koç, İ. Esen, H. Dal, Analysis of vehicle bridge dynamic interaction using quarter car model, in: 1st Int. Conf. Engineering Technol. Appl. Sci., Afyon, 2016: pp. 270–275.
- [3] K. Liu, G. De Roeck, G. Lombaert, The effect of dynamic train-bridge interaction on the bridge response during a train passage, *J. Sound Vib.* (2009). doi:10.1016/j.jsv.2009.03.021.
- [4] C.I. Bajer, B. Dyniewicz, *Numerical Analysis of Vibrations of Structures under Moving Inertial Load*, Springer, New York, 2012. doi:10.1007/978-3-642-29548-5.
- [5] T.P. Chang, G.L. Lin, E. Chang, Vibration analysis of a beam with an internal hinge subjected to a random moving oscillator, *Int. J. Solids Struct.* 43 (2006) 6398–6412. doi:10.1016/j.ijsolstr.2005.10.013.
- [6] H.P. Lee, Transverse vibration of a Timoshenko beam acted on by an accelerating mass, *Appl. Acoust.* 47 (1996) 319–330. doi:10.1016/0003-682X(95)00067-J.
- [7] H. Azimi, K. Galal, O.A. Pekau, A modified numerical VBI element for vehicles with constant velocity including road irregularities, *Eng. Struct.* 33 (2011) 2212–2220. doi:10.1016/j.engstruct.2011.03.012.
- [8] S.Q. Wu, S.S. Law, Vehicle axle load identification on bridge deck with irregular road surface profile, *Eng. Struct.* 33 (2011) 591–601. doi:10.1016/j.engstruct.2010.11.017.
- [9] I. Esen, Dynamic response of a beam due to an accelerating moving mass using moving finite element approximation, *Math. Comput. Appl.* 16 (2011) 171–182.
- [10] İ. Esen, M.A. Koç, Dynamic response of a 120 mm smoothbore tank barrel during horizontal and inclined firing positions, *Lat. Am. J. Solids Struct.* 12 (2015) 1462–1486.
- [11] C. Mızrak, İ. Esen, Determining Effects of Wagon Mass and Vehicle Velocity on Vertical Vibrations of a Rail Vehicle Moving with a Constant Acceleration on a Bridge Using Experimental and Numerical Methods, *Shock Vib.* 2015 (2015) 1–15. doi:10.1155/2015/183450.
- [12] Y.L. Cheung, W.O. Wong, H_∞ and H_2 optimizations of a dynamic vibration absorber for suppressing vibrations in plates, *J. Sound Vib.* 320 (2009) 29–42. doi:10.1016/j.jsv.2008.07.024.
- [13] M.A. Koç, İ. Esen, Modelling and analysis of vehicle-structure-road coupled interaction considering structural flexibility, vehicle parameters and road roughness †, *J. Mech. Sci. Technol.* 31 (2017) 1–18. doi:10.1007/s12206-017-0913-y.
- [14] M.A. Koç, E. Esen, Influence of Train Mass on Vertical Vibration Behaviour of Railway Vehicle and Bridge Structure, in: 3rd Int. Symp. Railw. Syst. Eng., Karabük, 2016: pp. 184–189.
- [15] İ. Koc, Mehmet Akif; Esen, The Effect of the Flexibility of a Bridge on the Passenger Comfort of a Travelling Vehicle Including Road Roughness, in: ISITES 2015, Valencia, 2015: pp. 2206–2215.
- [16] M.A. Koç, İ. Esen, Y. Çay, Ö. Çerlek, M. Asım, H. Dal, M. Eroğlu, Vibration Suppression of Vehicle-Bridge-Interaction System using Multiple Tuned Mass Dampers, in: 5th Int. Symp. Innov. Technol. Eng. Sci., 2017: pp. 1–8.

Atıksudan Fotokatalitik Yöntemle Boya Giderimi Ve Mineralizasyonu

¹Meltem Sarioğlu Cebeci, ^{*2}Sefa Furkan Selçuk

¹Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, sarioglumeltem@gmail.com, 

²Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, sefafurkan.selcuk@gmail.com, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 26.09.2019

Kabul Tarihi: 25.05.2020

Öz

Gelecek yılların en önemli çevresel sorunlarından biri su kirliliği ve su kıtlığıdır. Bu nedenle boyahaneleriyle yüksek miktarda su tüketen tekstil endüstrisi gibi üretim tesislerinin atıksularının ileri düzeyde arıtımı oldukça önemlidir. Bu atık suların uygun şekilde arıtılmaması insan ve canlı çevre üzerinde toksik ve kanserojenik etki yapmaktadır. Boyarmaddelerin karmaşık kompleks yapıları kirlittikleri suyun arıtımını oldukça zorlaştırmaktadır. Bu nedenle klasik arıtım yöntemleri yetersiz kalmaktadır. Son zamanlarda, bir ileri arıtım tekniği olan fotokatalitik yöntem boya giderimi konusunda ilgi çekmeye başlamıştır. Bu çalışmada katyonik boyanın (metilen mavisi) fotokatalitik yöntemle sulu çözeltiden giderimi ve mineralizasyonu çalışılmıştır. Deneyler için kullanılan reaktör laboratuvarında özel olarak tasarlanmıştır. Ultraviyole ışık kaynağı olarak UV-C lambalar kullanılmıştır. Katalizör olarak en yaygın kullanılan iki katalizör olan TiO₂ ve ZnO seçilmiştir. Mineralizasyon çalışmasının yanı sıra katalizörlerin optimum pH'ları, karışım halinde kullanıldığında alınan verim ve tekrar kullanıma uygunlukları değerlendirilmiş ve kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: boya, fotokatalitik, mineralizasyon, TiO₂, ZnO

Photocatalytic Dye Removal And Mineralization From Wastewater

¹Meltem Sarioğlu Cebeci, ^{*2}Sefa Furkan Selçuk

¹Environmental Engineering Department, Sivas Cumhuriyet University, sarioglumeltem@gmail.com

²Environmental Engineering Department, Sivas Cumhuriyet University, sefafurkan.selcuk@gmail.com

Abstract

One of the most important environmental problems for the coming years is water pollution and water scarcity. For this reason, advanced treatment of wastewater from production facilities such as the textile industry, which consumes large amounts of water through dyeing plants, is very important. Improper treatment of these wastewaters has toxic and carcinogenic effects on human and living environment. Complex structures of dyestuffs make the treatment of the water contaminated by them quite difficult. Therefore, classical treatment methods are insufficient. Recently, photocatalytic method, an advanced treatment technique, has begun to attract interest on dye removal. In this study, removal and mineralization of cationic dye (methylene blue) from aqueous solution by photocatalytic method was studied. The reactor used for the experiments was specially designed in the laboratory. UV-C lamps are used as ultraviolet light source. TiO₂ and ZnO as the catalyst most widely used two catalysts were selected. In addition to the mineralization study, the optimum pH of the catalysts, the efficiency obtained when used as a mixture and their suitability for reuse were evaluated and compared.

Keywords: dye, photocatalytic, mineralization, TiO₂, ZnO

1. GİRİŞ

Sanayileşmenin bir sonucu olarak, çevre kirliliği her yıl artmakta ve dünyada onarılamaz bir hasara neden olmaktadır. İnsan ve canlı çevre için hayat kaynağı olan su

kaynaklarının kirlenmesi canlı sağlığını olumsuz yönde etkileyen en ciddi küresel sorunlardan biri haline gelmiştir. Her yıl büyük miktarda atık su, arıtılmadan veya yeterince arıtılmadan su kaynaklarına deşarj edilmektedir. Farklı su kirleticileri arasında boyarmaddeler başlıca kirleticilerden

^{*2}Sorumlu yazar: Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye, sefafurkan.selcuk@gmail.com, 05558336993

³“Tekstil boyasının sulu çözeltiden fotokatalitik reaktörle giderimi ve farklı katalizörlerin veriminin incelenmesi” başlıklı tezden üretilmiştir.

biridir. Asit, bazik, direkt, dispers, metalik, mordan, pigment, reaktif, solvent ve kükürt gibi çeşitli sınıflara ayrılabilen boyalar; kumaş, deri, kâğıt, gıda, kozmetik, tarımsal araştırma, ilaç ve elektro kaplama gibi çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. Yılda 10.000.000 tondan fazla ticari boya üretilir ve bunun %65'i tekstil endüstrisinde tüketilir [1, 2]. Tekstil atıklarındaki en büyük sorun, yüksek oranda kimyasal madde ve boya kullanılmasıdır [3]. Tekstil boyama işlemleri sırasında bunların %20'sinin endüstriyel atık olarak atıldığı varsayılmaktadır [4]. 1 kg tekstil üretilirken, yaklaşık 200 L su kirlenir [5].

Suda boya kirliliği, boyalar suyun saydamlığını ve estetik özelliklerini çok düşük konsantrasyonlarda bile etkilediği için gözle kolayca görülebilir. Tekstil atık suyunun yüksek inorganik ve organik çözünmüş madde içeriği, değişken pH ve biyolojik olarak zor çözünebilir bileşiklerin varlığı nedeniyle yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı değerlerine sahip olduğu kabul edilmektedir [2]. Boya, güneş ışığının düşük konsantrasyonlarda bile suya girmesini önler ve sudaki gaz çözünürlüğünü azaltır [6, 7]. Böylece sudaki organizmaların büyümesini engeller ve fotosentezi önler. Ayrıca, konsantrasyonlarına ve maruz kalma sürelerine bağlı olarak organizmalar üzerinde akut veya kronik etkileri olabilir. Örneğin, mutajenlik, kanserojenlik, insanlarda solunum problemleri, merkezi sinir sistemi bozuklukları, davranışsal problemler ve alerjik reaksiyonlara neden olabilir [8, 2]. Bu nedenle, boyarmaddelerin gideriminin yanı sıra toksisitelerinin de giderilmesi veya azaltılması önemlidir.

Boya içeren atık suların arıtılması için fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler kullanılmaktadır [9]. Biyolojik arıtma, atık su arıtımında yaygın ve ekolojik bir yöntemdir. Bununla birlikte, boyalar karmaşık kimyasal yapıları nedeniyle genellikle biyolojik olarak parçalanamazlar ve bu nedenle boyaların giderilmesinde biyolojik yöntem genellikle tatmin edici değildir. Ayrıca, biyolojik arıtma işleminde çamurun bertaraf edilmesi ek maliyet ve işçilik gerektirir. Tekstil atık sularından renk giderimi için sedimantasyon, adsorpsiyon, klorlama, ozonlama, flokülasyon, ters osmoz ve ultrafiltrasyon gibi fiziksel ve kimyasal işlemler de kullanılabilir [4]. Fiziksel ve kimyasal yöntemler etkili olsa da, arıtma işlemi sırasında oluşan çamur ilave maliyet getirir [10, 11, 12]. Ek olarak, kullanılan kimyasallar ikincil kirlenmeye neden olabilir. Ultrafiltrasyon ve ters osmoz gibi membran sistemler de her ne kadar etkili olsalar da kısa ömürleri ve yüksek maliyetleri nedeniyle, boya gideriminde yaygın değildirler [7, 13]. Bu nedenle alternatif arıtım yöntemlerine ihtiyaç vardır. Tekstil boyası atık sularının toksikolojik etkileri, uygun yöntem kullanılmadıkça asla azalmayacaktır [14, 15].

Son yıllarda, boyaların atıksudan tamamen giderimi için yarı iletken parçacıklardaki fotolitik reaksiyonlara duyulan ilgi artmaktadır [16]. Fotokatalitik sistem, bir katalizör ve bir ultraviyole ışık kaynağından oluşur. Bu yöntem, hidroksil

radikallerinin üretimine dayanan hızlı, seçici olmayan ve etkili bir yöntemdir. Bu süreçte, organik maddeler H_2O , CO_2 ve diğer toksik olmayan inorganik bileşiklere dönüştürülür ve ikincil kirlilik yaratmaz [16]. Suda mevcut olan herhangi bir boyarmadde bileşiğinin fotokatalitik bozulmasında katalizör malzemenin bant enerji boşluğu büyük bir rol oynar. İşlemin etkili olması için foton enerjisinin katalizörün bant enerji boşluğu seviyesinden büyük veya ona eşit olması gerekir. Bu aktivite molekülün uyarılmasıyla sona ermektedir [17]. Uyarılmış yarıiletkende elektron ve elektron boşluğu çiftleri oluşur. Bu işlem tersine çevrilirse ve elektron ile ortaya çıkan elektron boşluğu geri birleştirilirse arıtma verimliliği düşer. Literatürde, bant boşluğu seviyesi 2.0 ila 3.3 eV aralığında olan yarıiletkenlerin atıksu arıtımında fotokatalizör olarak etkin kullanımlarının olduğu bildirilmiştir [2].

TiO_2 , yüksek fotokatalitik aktivitesi ve sulu çözeltilerdeki yüksek kararlılığı nedeniyle en yaygın kullanılan katalizördür, ancak yeterince ekonomik değildir. ZnO 'nun benzer bir foto parçalanma mekanizması ve düşük maliyeti ile TiO_2 'ye bir alternatif olduğu düşünülmektedir [4, 10]. Bu çalışmada Metilen Mavisi (MM) boyarmaddesinin sudan tamamen giderilmesi araştırıldı. İşlem TiO_2 ve ZnO katalizörleri ile gerçekleştirildi ve katalizörler karşılaştırıldı.

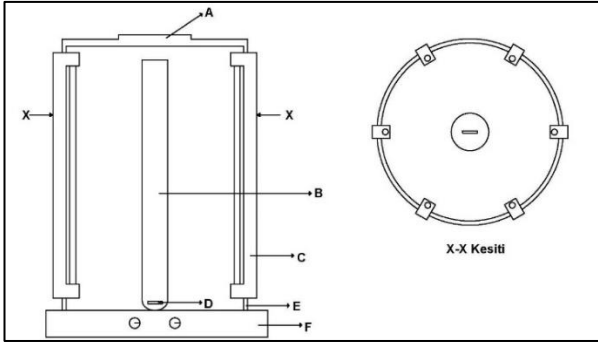
2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Deneysel Yöntem

Deneyler için 400 ml'lik MM sulu çözeltiler hazırlanmıştır. Çözeltilere toz katalizörler eklenmiş ve reaksiyon yapay UV-C ışığı altında gerçekleştirilmiştir. Çözelti, reaksiyon sırasında sabit hızla manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Katalizörler çözeltilere eklendikten sonra, çözelti UV-C lambaları açılmadan 1 dakika boyunca karıştırılmış ve ilk numune alınmıştır. Bu numune grafiklerde "0 dk" olarak adlandırılmıştır. Daha sonra UV-C lambaları açılmış ve 180 dakika boyunca her 30 dakikada bir su numunesi alınmıştır. Numunelerdeki katalizörler 0.45 mikron filtre ile ayrılmıştır. Bu filtreler MM boyarmaddelerini tutamamaktadır. Numunelerin renk değerleri, spektrofotometrik yöntemle ölçülmüş ve reaksiyon verimi yüzdeleri hesaplanmıştır. Çözeltilerin pH değerleri, 0.01N NaOH ve 0.01N H_2SO_4 kullanılarak istenen değerlere ayarlanmıştır.

2.2. Fotokatalitik Reaktör

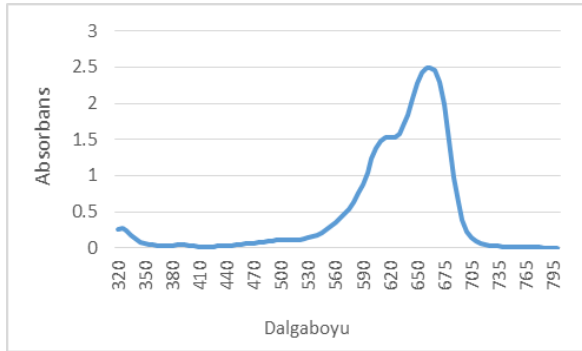
Şekil 1'de gösterilen kesikli tip silindirik reaktör araştırma için tasarlanmıştır. Işığı saçılmasının engellemek için reaktör siyah folyo ile kaplanmıştır. 6 adet UV-C lambası eşit aralıklarla reaktörün çevresine yerleştirilmiştir. Kullanılan lambalar 254 nm dalga boyunda ışık yayan 8w floresan lambalardır. Sulu çözelti, 500 ml hacimli bir kuvars tüp ile reaktörün ortasına yerleştirilmiş ve çözeltinin homojenliğini sağlamak için manyetik bir karıştırıcı kullanılmıştır.



Şekil 1. Fotokatalitik reaktörün şematik gösterimi. A: Kapak, B: Quartz tüp, C: UV-C lamba ve duy, D: Manyetik balık, E: Silindirik reaktör, F: Manyetik karıştırıcı.

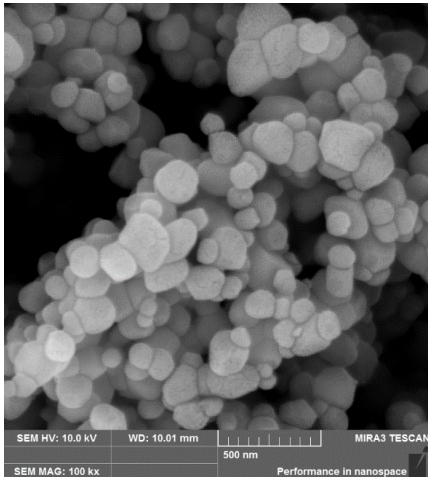
2.3. Boya ve Katalizörler

Deneyler için katyonik bir boya olan MM kullanılmıştır. Bu boya balık yetiştirme çiftlikleri, tıp ve tekstil endüstrisi gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Boyanın kimyasal formülü " $C_{16}H_{18}N_3SCl$ ", λ_{max} değeri 663nm (Şekil 2) ve moleküler ağırlığı 373.9 g/mol'dür.



Şekil 2. Metilen Mavi boyasının dalga boyu taraması.

Anataz ve rutil katalizör olarak yaygın olarak kullanılan TiO_2 formlarıdır. Çalışmada anataz yapısında TiO_2 kullanılmış ve fotokatalizör alındığı şekilde kullanılmıştır. Tablo 1'de, kullanılan TiO_2 hakkında veriler görülmektedir. TiO_2 'nin SEM görüntüsü, Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Kullanılan TiO_2 'nin SEM görüntüsü.

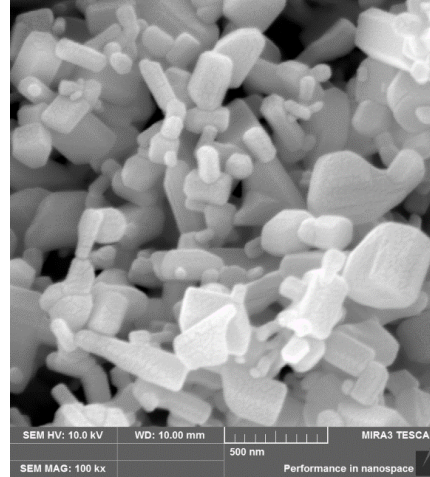
Tablo 1. Kullanılan TiO_2 'nin tanecik boyutları

En Büyük Tanecik Boyutu	286.64 nm
En Küçük Tanecik Boyutu	84.49 nm
Ortalama Tanecik Boyutu	163.723 nm
BET Yüzey Alanı Ölçümü	16.00 m ² /g
Gözenek Hacmi	0.1847 cc/g
Molekül Ağırlığı	79.87 g/mol

ZnO geniş optiksel enerji bant boşluğu seviyesine sahip bir yarı iletkenidir ($E_g = 3.33$ eV). Bu nedenle kullanımı yaygınlaşmıştır. Katalizör olarak Wurtzite yapısında ZnO kullanılmış ve fotokatalizör alındığı şekilde kullanılmıştır. Tablo 2'de, kullanılan ZnO hakkında veriler görülmektedir. ZnO'nun SEM görüntüsü, Şekil 4'te verilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan ZnO'nun tanecik boyutları

En Büyük Tanecik Boyutu	395.52 nm
En Küçük Tanecik Boyutu	63.10 nm
Ortalama Tanecik Boyutu	197.90 nm
BET Yüzey Alanı Ölçümü	15.81 m ² /g
Gözenek Hacmi	0.07616 cc/g
Molekül Ağırlığı	81.37 g/mol



Şekil 4. Kullanılan ZnO'nun SEM görüntüsü

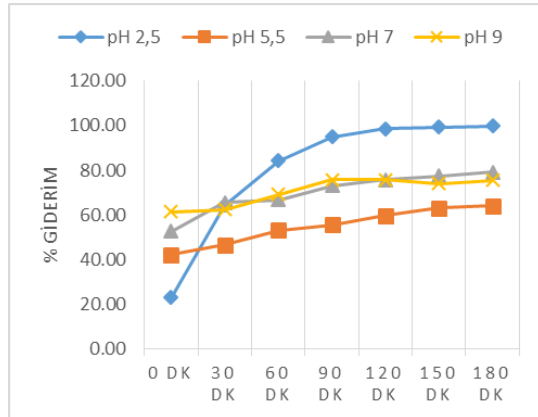
3. BULGULAR

3.1. Optimum pH Tayini

Suyun pH'ı, amfoterik özelliklerinden dolayı katalizör yüzeyi için önemli bir parametredir. Sistemde boyarmadde molekülleri yüzeye adsorbe olarak bozduğu ve OH^- radikalleri yüzeyde oluştuğu için katalizörün yüzey yükü çok önemlidir [18].

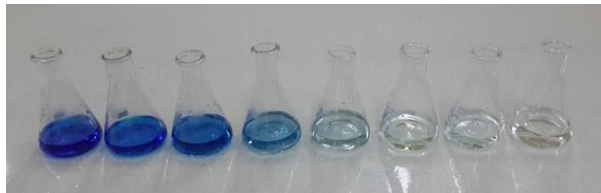
Optimum pH değerlerini bulmak için pH; 2.5, 5.5, 7.0 ve 9.0 değerlerinde 180 dk çalışılmıştır. Çalışmada 1 g/L katalizör, 3 adet UV-C lamba, 25 mg/L konsantrasyonunda MM sulu çözeltisi kullanılmıştır. TiO_2 ile yapılan analizlerin renk giderim verimlerinin grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, maksimum giderim verimi pH 2.5'te ve

%99.88 olarak bulunmuştur. TiO_2 ile pestisit giderilmesi konusunda yapılan bir çalışmada, optimum pH değeri pH 3-4 aralığında olduğu ifade edilmiştir [19]. Ortam pH'ı, TiO_2 'nin izoelektrik değeri olan pH 6.8'in altına indikçe TiO_2 yüzeyi pozitif yüklenir (Denklem 3.1). Pozitif yüklenen yüzey OH^- iyonlarıyla kaplanmakta ve böylece ortamda hidroksil radikali üretimi artmaktadır. Denklem 3.2'de görüleceği üzere pH 6.8'den yüksek olduğu durumlarda OH^- radikali yoğunluğu düşmekte ve dolayısıyla arıtım verimi azalmaktadır [20].

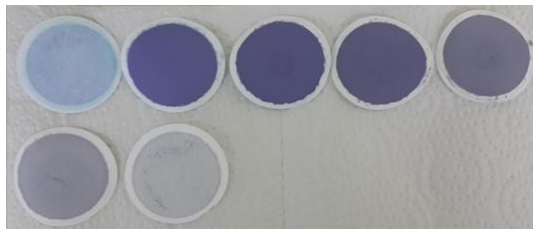


Şekil 5. TiO_2 'nin renk giderim verimine pH'nin etkisi.

pH 2.5'teki MM çözeltisine ait örnekler Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 7'de sudan ayrılmış katalizörler filtre kâğıdı üzerinde görülmektedir. Grafik incelendiğinde, işlem 120-180 dakika arasında durgun olarak görülmesine rağmen, Şekil 7'de görüldüğü gibi suda olmasa bile katalizör üzerine adsorplanmış boya ların giderimi devam etmektedir.



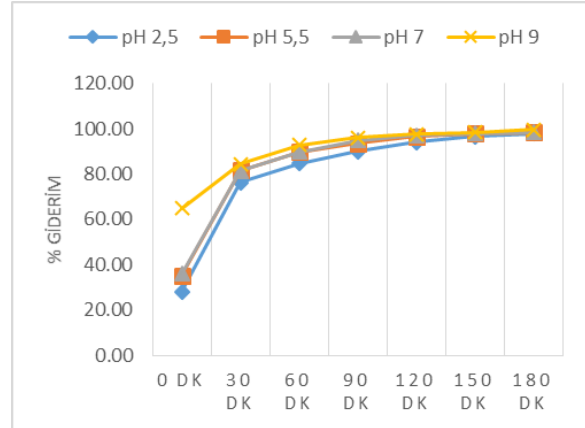
Şekil 6. pH 2.5'te 1 g/L TiO_2 ile 25 mg/L MM çözeltisinin renk giderimi (Soldan sağa; başlangıç, 0. dakikada ve sonra 30 dakika arayla alınan numuneler).



Şekil 7. pH 2.5'te 1 g/L TiO_2 ile 25 mg/L MM çözeltisinin renk gideriminde filtre edilmiş katalizörler (Soldan sağa; 0. dakikada ve sonra 30 dakika arayla alınan örnekler).

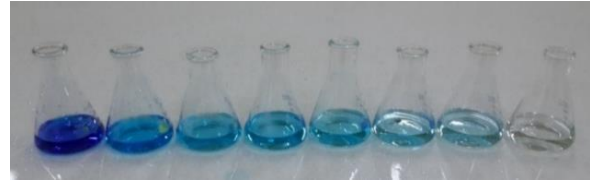
Optimum pH çalışmasında ZnO ile renk giderim verimi Şekil 8'de verilmiştir. Çalışılan tüm pH değerleri ZnO'nun

izoelektrik değerinin (pH 9.5) altındadır. Grafik incelendiğinde, nihai verim tüm pH'larda neredeyse aynıdır. Bununla birlikte, pH 9'daki başlangıç verimi önemli ölçüde daha yüksektir. Başka bir deyişle, boya pH 9'da ZnO'ya çok daha hızlı adsorbe edilir. ZnO ile yapılan bir çalışmada yüksek pH değerlerinde daha yüksek verim elde edilmiş ve pH 10'da maksimum verim elde etmiştir [21].

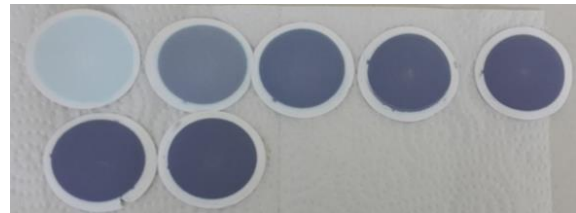


Şekil 8. ZnO'nun renk giderim verimine pH'nin etkisi.

Şekil 9'da, pH 9'da gerçekleştirilen çalışmada ZnO'dan alınan numuneler, Şekil 10'da filtre ile ayrılan katalizörler göstermektedir. Suda 180. dakikada su verimi %99.56 iken, Şekil 10'da görüldüğü gibi katalizör yüzeyine adsorbe olmuş önemli miktarda boya hala mevcut.



Şekil 9. pH 9'da 1 g/L ZnO ile 25 mg/L MM çözeltisinin renk giderimi (Soldan sağa; başlangıç, 0. dakikada ve sonra 30 dakika arayla alınan numuneler).

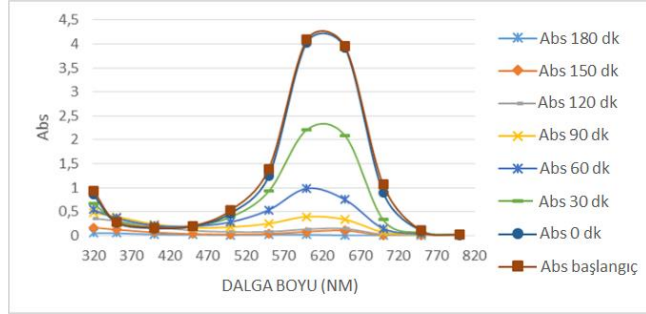


Şekil 10. pH 9'da 1 g/L ZnO ile 25 mg/L MM çözeltisinin renk gideriminde filtre edilmiş katalizörler (Soldan sağa; 0. dakikada ve sonra 30 dakika arayla alınan örnekler).

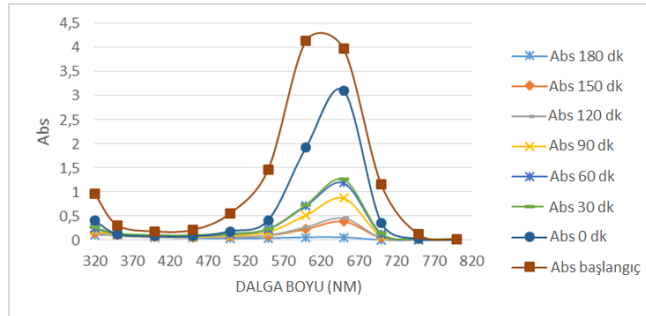
3.2. Mineralizasyonun İzlenmesi

Mineralizasyonun izlenmesi için, katalizör eklenmeden (başlangıç), katalizör eklendikten sonra lambalar açılmadan (0 dakika) ve lambalar açıldıktan sonra her 30dk'da bir alınan numunelerin spektrometrede dalga boyu taramaları yapılmış ve grafikleri birleştirilmiştir. TiO_2 ile yapılan çalışmanın grafiği Şekil 11'de ve ZnO ile yapılan çalışmanın

grafığı Şekil 12'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde tüm abs değerlerinin azaldığı ve sıfırlandığı görülecektir. ZnO ile yapılan farklı çalışmalarda da absorbands spektrumundaki tüm absorbands değerlerinde bir azalma gözlenmiştir [21, 22; 23]. TiO₂ ile yapılan çalışmada, 360-420 nm arasındaki absorbands değerlerinde küçük bir artış 90 dakikaya kadar gözlenmiştir. Daha sonra tüm dalga boylarının absorbands değeri sıfırlanmıştır.



Şekil 11. TiO₂ çalışmasında mineralizasyon izlenmesi (25 mg/L MM, 1 g/L TiO₂, pH 2.5).



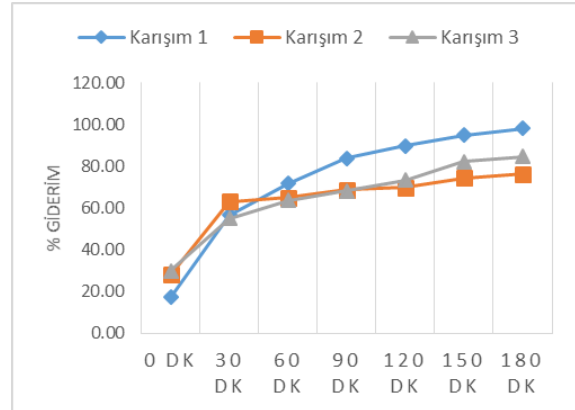
Şekil 12. ZnO çalışmasında mineralizasyon izlenmesi (25 mg/L MM, 1 g/L ZnO, pH 9).

3.3. Karışım Katalizörler

Katalizörlerle karışım olarak çalışıldığında verimlerini görmek için 3 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışım 1; 0.1 g/L TiO₂ + 0.9 g/L ZnO, Karışım 2; 0.3 g/L TiO₂ + 0.7 g/L ZnO, Karışım 3; 0.5 g/L TiO₂ + 0.5 g/L ZnO konsantrasyonlarında hazırlanmıştır. Çalışmada ortam koşulları, pH 2.5, 3 adet UV-C lamba ve 25 mg/L MM olarak ayarlanmıştır. Verim grafikleri Şekil 13'te verilmiştir.

Karışım 1 ile yapılan çalışmada, nihai verim %98.16 ile karışım katalizörleri arasında en yüksek verim olmuştur. Aynı pH değerinde 1 g/L ZnO'da %97.84 verim elde edildi (Bkz. Şekil 8). Verimler birbirine çok yakın olduğu için etkisinin olmadığı söylenebilir. Bununla birlikte, karışımındaki TiO₂ oranının artırıldığı, karışım 2 ile yapılan çalışmada, oksidasyon oranı önemli ölçüde azaltılmış ve nihai verim %76.24 olmuştur. TiO₂ oranını daha da artırarak Eşit TiO₂ ve ZnO miktarlarının kullanıldığı Karışım 3 ile yapılan çalışmada verim %84.68'e yükselmiştir. Bununla birlikte, çalışmada aynı koşullar altında sadece 0.5 g/L TiO₂ ile %86.04 verim elde edilmiştir. Tüm veriler dikkate alındığında, tüm oranlardaki katalizörlerin birbirlerinin çalışmasını inhibe ettiği söylenebilir. Karışım katalizörlerle

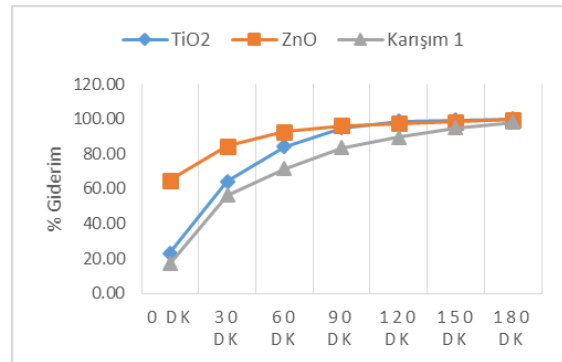
yapılan başka bir çalışmada, saf ZnO katalizörü ile TiO₂ ve ZnO'nun karışımından daha yüksek bir verim elde etmiştir [24].



Şekil 13. Karışım katalizörlerin verim grafiği (pH 2.5, 25 mg/L MM, 1 g/L katalizör).

3.4. Katalizörlerin Karşılaştırılması

Katalizörlerin kıyaslanması için 25 mg/L MM konsantrasyonunda, optimum pH değerlerinde en yüksek verim alınan TiO₂ ve ZnO değerleri ayrıca karışım katalizörlerinden en yüksek verim alınan Karışım 1 çalışmasının değerleri Şekil 14'te grafikleştirilmiştir. Şekil 15'te ise başlangıç konsantrasyonu, ZnO ile artırılan su ve TiO₂ ile artırılan su örnekleri yan yana fotoğraflanmıştır. Grafikten görüleceği üzere nihai verimler çok yakın olsa da karışım katalizörün oksidasyon hızı TiO₂'ye göre oldukça düşüktür. ZnO ve TiO₂ karşılaştırılacak olursa, lambalar çalıştırılmadan 0.dk'da alınan numunelerde ZnO çok yüksek verim vermiştir ancak nihai verim %99.56 olmuştur. TiO₂ ile ise nihai verim %99.88'le azda olsa ZnO'dan fazla olmuştur. Bu durum ZnO ile elde edilen giderim hızının adsorpsiyondan kaynaklandığını göstermektedir. Ayrıca Şekil 15 incelendiğinde TiO₂ ile renk giderimi sağlanan suyun gözle görünür renk kalmadığı anlaşılmaktadır. Şekil 7 ve Şekil 10'da görülen filtre üzerindeki katalizörler kıyaslandığında katalizör üzerindeki rengin ZnO'da daha geç giderildiği görülmektedir.



Şekil 14. 25 mg/L MM konsantrasyonunda katalizör verimlerinin karşılaştırılması.



Şekil 15. 25 mg/L MM başlangıç kons. (soldaki), 1 g/L ZnO ile pH 9'da arıtılmış su (ortadaki) ve 1 g/L TiO₂ ile pH 2.5'te arıtılmış su (sağdaki).

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Optimum pH tayini çalışmasında; TiO₂ katalizörü için en yüksek verim pH 2.5'te %99.88 olmuştur. ZnO katalizörü için en yüksek verim pH 9'da %99.56 olarak bulunmuştur.

Mineralizasyon izlenmesinde; her iki katalizörle de farklı dalga boylarında sulu çözeltinin absorpsiyon değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. TiO₂ katalizörü ile reaksiyon sırasında az miktarda bir ara ürün oluşumu gözlenmiş, ancak bu ara ürünler de arıtım sonucunda giderilmiştir.

ZnO ve TiO₂ katalizörleri karışım halinde kullanıldığında birbirlerini inhibe ettiği tespit edilmiştir. Saf katalizörler ile karışım katalizörlerden daha yüksek verimler elde edilmiştir.

TiO₂ katalizörü ile ZnO katalizöründen çok daha hızlı oksidasyon sağlanmıştır. ZnO katalizörü ile TiO₂'den çok daha hızlı adsorpsiyon sağlanmıştır. TiO₂ katalizörü ile arıtım verimliliği daha yüksektir. TiO₂, katalizörün yeniden kullanımı için daha uygundur ve ZnO, değişken veya yüksek pH değerleri olan atık sularda kullanım için daha uygundur.

KAYNAKÇA

[1] S. R. Couto, "Dye removal by immobilised fungi", *Biotechnology Advances*, vol. 27, no. 3, pp. 227–235, 2009..

[2] S. Natarajan, H. C. Bajaj, and R. J. Tayade, "Recent advances based on the synergetic effect of adsorption for removal of dyes from waste water using photocatalytic process", *Journal of Environmental Sciences*, vol. 65, pp. 201–222, 2018.

[3] A. B. D. Santos, F. J. Cervantes, and J. B. V. Lier, "Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology", *Bioresource Technology*, vol. 98, no. 12, pp. 2369–2385, 2007.

[4] C. Ram, R. K. Pareek and V. Singh, "Photocatalytic degradation of textile dye by using titanium dioxide nanocatalyst", *International Journal of Theoretical and Applied Sciences*, vol. 4, no. 2, pp. 82–88, 2012.

[5] A. R. Petcu, C. A. Lazar, E. A. Rogozea, N. L. Olteanu, A. Meghea, and M. Mihaly, "Nonionic microemulsion systems applied for removal of ionic dyes mixtures from textile industry wastewaters", *Separation and Purification Technology*, vol. 158, pp. 155–159, 2016.

[6] G. Crini and P.-M. Badot, "Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: A review of recent literature", *Progress in Polymer Science*, vol. 33, no. 4, pp. 399–447, 2008.

[7] Y. Zhou, J. Lu, Y. Zhou, and Y. Liu, "Recent advances for dyes removal using novel adsorbents: A review", *Environmental Pollution*, vol. 252, pp. 352–365, 2019.

[8] H. Pan, J. Feng, G.-X. He, C. E. Cerniglia, and H. Chen, "Evaluation of impact of exposure of Sudan azo dyes and their metabolites on human intestinal bacteria", *Anaerobe*, vol. 18, no. 4, pp. 445–453, 2012.

[9] V. Gupta and Suhas, "Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review", *Journal of Environmental Management*, vol. 90, no. 8, pp. 2313–2342, 2009.

[10] N. Daneshvar, D. Salari, and A. Khataee, "Photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water: investigation of the effect of operational parameters", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 157, no. 1, pp. 111–116, 2003.

[11] D. Georgiou, P. Melidis, A. Aivasidis, and K. Gimouhopoulos, "Degradation of azo-reactive dyes by ultraviolet radiation in the presence of hydrogen peroxide", *Dyes and Pigments*, vol. 52, no. 2, pp. 69–78, 2002.

[12] M. Moradi, F. Ghanbari, M. Manshour, and K. A. Angali, "Photocatalytic degradation of azo dye using nano-ZrO₂/UV/Persulfate: Response surface modeling and optimization", *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 33, no. 2, pp. 539–546, Dec. 2015.

[13] U. Shamraiz, R. A. Hussain, A. Badshah, B. Raza, and S. Saba, "Functional metal sulfides and selenides for the removal of hazardous dyes from Water", *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 159, pp. 33–41, 2016.

[14] N. Nandhini, S. Rajeshkumar, and S. Mythili, "The possible mechanism of eco-friendly synthesized nanoparticles on hazardous dyes degradation", *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, vol. 19, p. 101138, 2019.

[15] M. Ghaedi, S. Hajjati, Z. Mahmudi, I. Tyagi, S. Agarwal, A. Maity, and V. Gupta, "Modeling of competitive ultrasonic assisted removal of the dyes – Methylene blue and Safranin-O using Fe₃O₄ nanoparticles", *Chemical Engineering Journal*, vol. 268, pp. 28–37, 2015.

[16] B. Neppolian, S. Sakthivel, B. Arabindoo, M. Palanichamy, and V. Murugesan, "Degradation of textile dye by solar light using TiO₂ and ZnO photocatalysts", *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, vol. 34, no. 9, pp. 1829–1838, 1999.

[17] M. Kaneko and I. Okura, *Photocatalysis: science and technology*. Tokyo: Kodansha, 2011.

[18] R. P. Souza, T. K. Freitas, F. S. Domingues, O. Pezoti, E. Ambrosio, A. M. Ferrari-Lima, and J. C. Garcia, "Photocatalytic activity of TiO₂, ZnO and Nb₂O₅ applied to degradation of textile wastewater", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 329, pp. 9–17, 2016.

[19] X. Zhu, C. Yuan, Y. Bao, J. Yang, and Y. Wu, "Photocatalytic degradation of pesticide pyridaben on TiO₂

particles”, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, vol. 229, no. 1-2, pp. 95–105, 2005.

[20] N. Guettaï and H. A. Amar, “Photocatalytic oxidation of methyl orange in presence of titanium dioxide in aqueous suspension. Part I: Parametric study,” *Desalination*, vol. 185, no. 1-3, pp. 427–437, 2005.

[21] A. Akyol, H. Yatmaz, and M. Bayramoglu, “Photocatalytic decolorization of Remazol Red RR in aqueous ZnO suspensions”, *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 54, no. 1, pp. 19–24, 2004.

[22] M. Konyar, H. C. Yatmaz, and K. Öztürk, “Sintering temperature effect on photocatalytic efficiencies of ZnO/TiO₂ composite plates”, *Applied Surface Science*, vol.



258, no. 19, pp. 7440–7447, 2012.

[23] E. Yassitepe, H. Yatmaz, C. Öztürk, K. Öztürk, and C. Duran, “Photocatalytic efficiency of ZnO plates in degradation of azo dye solutions”, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 198, no. 1, pp. 1–6, 2008.

[24] D. Štrbac, C. A. Aggelopoulos, G. Štrbac, M. Dimitropoulos, M. Novaković, T. Ivetić, and S. N. Yannopoulos, “Photocatalytic degradation of Naproxen and methylene blue: Comparison between ZnO, TiO₂ and their mixture”, *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 113, pp. 174–183, 2018.

Armut (*Pirus communis L.*) Posasının Bazı Kalite Değerleri Açısından Uygun Kurutma Sıcaklığının Belirlenmesi

*¹ Hakan Polatçı, ¹ Muhammed Taşova, ² Onur Saraçoğlu

¹Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, hakan.polatci@gop.edu.tr, muhammed.tasova@gop.edu.tr,  

²Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, onur.saracoglu@gop.edu.tr, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 11.02.2019

Kabul Tarihi: 14.09.2020

Öz

Meyve posaları içerdiği besin değerlerinden dolayı, gübre olarak kullanımının yanında hayvan yemi olarak da kullanımı çok yaygındır. Kuşburnu, portakal, havuç, turp gibi birçok meyve sebze atıkları posa olarak değerlendirilmektedir. Çalışmada kapsamında, kabin tip bir kurutucu ile 60, 65 ve 70 °C sıcaklık değerlerinde kurutularak, armut posasının ortalama kuruma süreleri, renk, asitlik (pH), suda çözünebilir kuru madde (SÇKM) ve titrededilebilir asitlik (T.A.) değerleri belirlenmiştir. Ürün, kurutma havası sıcaklıklarında yaş baza (y.b.) göre % 10-13 nem seviyelerine kadar kurutulmuştur. Sıcaklık değerlerine göre ortalama kuruma süreleri sırasıyla; 24, 21 ve 12 saat olarak tespit edilmiştir. Kurutma işlemi esnasında uzaklaşan nem oranları kurutma eşitliklerinde işlenerek eğrileri oluşturulmuş ve en iyi tahmin eden modelin Midilli-Küçük olduğu belirlenmiştir. Kurutulan ürünlere ait ölçülen renk değerleri tazeye göre kıyaslanarak istatistikî açıdan en uygun kurutma havası sıcaklığı belirlenmiştir. Hesaplanarak belirlenen renk kriterlerinden olan, kroma değerleri tazeye göre kıyaslandığında en uygun değer 65 °C kurutma sıcaklığında belirlenmiştir. Kurutulan ürünlerin pomolojik özellikleri hakkında önemli bilgiler veren pH, SÇKM, ve T.A. özelliklerine ait en yüksek ve en düşük ortalama değerler ise sırasıyla; 3.65-3.44, 2.70-2.33, 1.68-1.10 olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Armut posası, konvektif kurutma, renk, kimyasal analiz

Determination of Appropriate Drying Temperature in Terms of Some Quality Values of Pear (*Pirus communis L.*)

*¹ Hakan Polatçı, ¹ Muhammed Taşova, ² Onur Saraçoğlu

¹Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Agriculture, Biosystem Engineering Department, hakan.polatci@gop.edu.tr, muhammed.tasova@gop.edu.tr

²Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Agriculture, Garden Plants Department, onur.saracoglu@gop.edu.tr

Abstract

Due to the nutritional value of fruit pulp, it is very common to use it as animal feed besides fertilizer. Many fruit and vegetable wastes such as rosehip, oranges, carrots and radishes are considered to be pulp. Within the scope of the study, average drying time of pear pulp, color, acidity (pH), water soluble dry matter (WSDM) and titratable acidity (T.A.) values were determined by drying in temperatures values of 60, 65 and 70 °C with a cabinet type dryer. The product was dried to 10-13% moisture levels at the drying air temperatures according to the age base (w.b.). Average drying times according to temperature values are as follows; 24, 21 and 12 hours. During the drying period, the moisture values in the unit time away from the product were processed in the thin layer drying models and drying curves were formed and the best estimating mathematical model was determined as the Midilli-Küçük. The measured color values of dried products were compared according to freshness and the most suitable drying air temperature was determined statistically. When the chroma values were compared to freshness, the most suitable value was determined at 65 °C drying temperature. The pH, WSDM and T.A. the highest and lowest average values are; 3.65-3.44, 2.70-2.33, 1.68-1.10.

Keywords: Pear pomace, convective drying, color, chemical

1. GİRİŞ

Armut (*Pirus communis* L.) gülgillerden olup [1], ilk olarak Asya kıtasında yetiştirilerek tüm dünyaya yayılmış olan bir meyve türüdür [2]. Armut meyvesi dünyada elma ve üzümünden sonra en fazla yetiştirilen meyvedir. Dünya üzerinde 5000 'den fazla armut çeşidi bulunduğu ve bunların yaklaşık 640 tanesi ülkemizde yetişmektedir [3-6]. Taze armudun bünyesinde; Vitaminler, fenolik bileşikler, organik asitler, yağ asitleri ve büyük miktarda da su bulunmaktadır [7-11].

Armutun meyve suyu şeklinde tüketimi, çay ve kahve gibi kafein içerikli içeceklere göre daha doğal olmasından dolayı son yıllarda önemli seviyede artış göstermektedir [12-13]. Armut, bünyesinde barındırdığı ortalama % 75-80 civarında su oranı ile meyve suyu üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Meyve suyu üretiminde oluşan meyve posaları ise yüksek oranda lif içermektedir. Bu nedenle, meyve posaları genellikle hayvan beslemesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun için yıl boyu bozulmadan kullanabilmek için meyve suyu üretimi sonrasında oluşan posalar uygun yöntemlerle kurutulup depolanmalıdır. Aksi takdirde hem kötü kokular oluşur hem de besin değerleri hızla parçalanıp kaybolur.

Kurutma; Yaş meyve posalarının güvenli bir şekilde saklanabilmesi için uygulanan en yaygın metotlardan biridir. Kurutma işlemi ile üründeki nemin büyük bir kısmı uzaklaştırılmakta ve ürün su aktivitesi değerinin düşürülüp, mikroorganizma faaliyetleri engellenmektedir [14]. Meyve ve posalarına ait nem seviyelerinin düşürülmesi için genellikle güneş, gölge ortamları ile yapay kurutucular kullanılmaktadır. Doğal kurutma yönteminde, kurutma süresinin uzun olma ve besin değerleri çok fazla kaybolmaktadır. Bunun yanında, zehirli gaz ve böceklerin ürünlerin üzerine konarak sağlık açısından uygun olmayan durumlar oluşturmaktadır.

Meyve posayla ilgili literatür de; [15]' deki çalışmada, sprey kurutma yöntemini kullanarak kuruttuğu Barbados kirazı posasının fiziksel özelliklerini belirlemiştir. [16]' da ki çalışmaya göre, kurutulan üzüm posası örneklerine katılan farklı maddelerin neticesinde posanın aneorabik ve bazı diğer kriterlere olan etkilerini belirlemiştir. [17]' de belirtilen çalışmaya göre, farklı kurutma şartlarında kuruttuğu kayısı posasının sosis üretiminde kullanım olanaklarını incelemiştir. [18]' de ifade edilen çalışmada, üç farklı kurutma sıcaklığı kullanarak kuruttuğu zeytin posasının kuruma karakteristiklerini belirlemiştir. [19]' da ki belirtilen çalışmada, akışkan yataklı bir kurutucuda zeytin posasını kurutarak ürünün kuruma kinetiği değişimini incelemiştir. [20]' de belirtilen çalışmaya göre, elma, kayısı ve şeftali posalarının bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerini araştırmışlardır. Literatür taraması sonucunda bazı meyve posaları üzerine yapılan kurutma çalışmalarının var olduğu

ancak armut posasının kurutma sıcaklıkları altında renk ve bazı kimyasal özellikler açısından uygun kurutma sıcaklığının belirlenmesi konusunda bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada, kabin tip bir kurutucu ile kurutulan armut posalarının kurutma sıcaklıkları açısından en uygun kuruma süresi, renk ve bazı kimyasal özellikleri belirlenerek literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kurutulacak ürün

Armut posası, meyve ve süt ürünleri üretim işletmesinden temin edildikten sonra kurutma laboratuvarına getirilmiştir. İşlemler sonlanana kadar posalar $+4 \pm 0.5$ °C sıcaklıktaki bir buzdolabında muhafaza edilmiştir.

2.2. Nem tayini

Yaş meyve posaları kurutulmadan önce nem içerikleri belirlenmiştir. Nem tayini işleminde ortalama 70' er g olmak üzere dörder tekerrür olarak yapılmıştır. İşlem 70 °C sıcaklığa sahip bir fırında, ürünler belli süre aralıklarında ağırlıkları ölçülerek sabit değere kadar bekletilmiştir [21].

2.3. Kurutma işlemi

İşlemler kabin tip bir konvektif kurutucuda 60, 65 ve 70 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. 3' er tekerrür halinde yapılan işlemlerde ortalama 70 ± 0.5 g ürün kullanılmıştır. Kurutulan ürünler ara ara belirli sürelerde % 1 hassasiyete sahip bir terazide tartılarak su içeriği % 10-13 seviyesine düşene kadar işlemler devam etmiştir [22-23].

2.4. Etüv kurutucu

Kurutma işleminde kullanılan konvektif kurutucu Şimşek Laborteknik marka olup ST-120 tip model kullanılmıştır. Kurutma sıcaklığını istenilen sıcaklığa ayarlayabilmek için, üzerinde bulunan PID kontrol denetleyiciler kullanılarak 30-250 °C sıcaklığa kadar ayarlanabilme özelliği bulunmaktadır.

2.5. Renk ölçümü

Tarımsal ve gıda ürünlerinin en önemli kalite değerleri kriterlerden birisi de renk özelliğidir. Ürünlerde meydana gelen olumsuz renk değişimleri, ürünlerin market değerini önemli seviyede olumsuz etkilemektedir [24-25]. Taze ve kurutulmuş armut posalarının renk ölçümlerinde Minolta

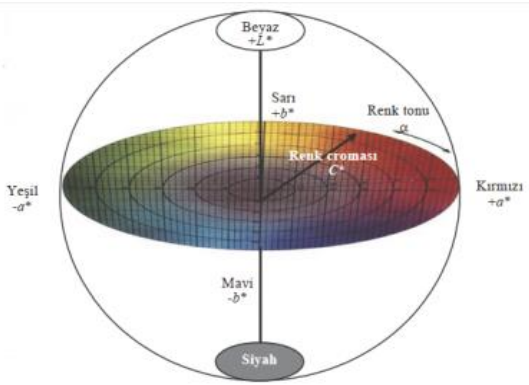
marka CR300 modeli renk ölçer kullanılmıştır. Renk ölçer ile posasının Hunter Lab Chromameter değerleri ölçülmüştür.

Ölçülen değerlerden L posasının parlaklığını temsil ederken 0 ile 100 arasında değişmektedir. a değeri posanın kırmızı ve yeşil, b değeri ise sarı ve mavi renkleri temsil etmektedir [26]. Ölçülen L, a ve değerleri tek başlarına bir anlam ifade etmezken bu değerler kullanılarak hesaplanan kroma değeri, hue açısı, toplam renk farklılığı ve kahverengileşme indeks değerleri hesaplanmıştır.

Kroma değeri: Ürün renginin tonunu ifade etmektedir. [27]' de belirtilen yöntemle göre, kroma değeri 1 nolu eşitlik kullanarak hesaplandığını ifade etmişlerdir.

$$C = (a^2 + b^2)^{1/2} \quad (1)$$

Hue değeri: Hue renk açısı değeri 360°'lik bir renk gradyanında her açıya karşılık gelen renklerin neler olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 1. Hue açısının renk radyantı [28].

0° kırmızı, 90° sarı, 180° yeşil ve 270° ise ürünün mavi renkte olduğunu bu açı değerlerinin aralarına karşılık gelen kısımlarda ara renklerin oluştuğunu ifade edilmiştir (Şekil 1). [29-30]' yapılan çalışmalara göre, hue renk açısı değerinin 2 nolu eşitlik kullanılarak hesaplandığını ifade etmişlerdir.

$$h^\circ = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2)$$

Toplam renk farklılık değeri: Taze ürünün ölçülen renk değerleri ile kurutulduktan sonraki renk değerleri arasındaki

değişimi ifade etmek için kullanılmaktadır. [28]' de belirtilen yöntemle göre, toplam renk farklılık değerinin 3 nolu eşitlik kullanılarak hesaplandığını ifade etmişlerdir.

$$\Delta E = \sqrt{(L_t - L_k)^2 + (a_t - a_k)^2 + (b_t - b_k)^2} \quad (3)$$

Eşitlikte L_t , a_t ve b_t değerlerinin sırasıyla taze ürünün parlaklık, kırmızı-yeşillik ve sarılık-mavilik renk değerlerini ifade ederken, L_k , a_k ve b_k değerleri ise kuru ürüne ait renk değerlerini ifade etmektedir.

Kahverengileşme indeksi: Ürünün kahverengileşme indeks değerini simgeleyen "BI" ile "x" katsayısı değerleri ise ürünün kuruma sonrası kahverengileşme değerini ifade etmektedir. [31]' ifade edilen çalışmaya göre, kahverengileşme indeks değeri ile bu değer hesaplanmasında kullanılan "x" katsayısının 6 ve 7 nolu eşitlikler kullanılarak hesaplandığını göstermişlerdir.

$$BI = \frac{[100(x - 0,31)]}{0,17} \quad (4)$$

$$x = \frac{a + (1,75 xL)}{[(5,645 xL) + (a - (3,012 xb))]} \quad (5)$$

2.6. Kuruma modeli

Armut posasında süreye göre uzaklaşan su oranı değeri 8 nolu eşitlik kullanılarak tespit edilmiştir.

$$ANO = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (6)$$

ANO: Posadan uzaklaşabilen su miktarı
M: Posa içerisinde bulunan o andaki su miktarı
 M_e : Posanın o şartlardaki denge nemi
 M_0 : Posanın su içeriği

Armut posasının kuruması esnasında uzaklaşan su oranlarına ait değerleri modellemek için literatürde çok sık kullanılan Page, Midilli-Küçük ve Yağcıoğlu eşitliklerinde işlenmiştir. Kullanılan modellere ait eşitlikler Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. İnce tabakalı matematiksel kuruma modelleri

No	Model ismi	Eşitlik
1	Page	$MR = \exp(-h \cdot (t^j))$
2	Midilli küçük	$MR = h \cdot \exp(-j \cdot (t^k)) + (1 \cdot t)$
3	Yağcıoğlu	$MR = k \cdot \exp(-h \cdot t) + j$

2.6. Kimyasal analizler

Taze ve kurutulmuş armut posalarının pH, T.A. ve SÇKM değerleri belirlenerek tazeye göre en uygun kurutma havası sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Yapılan analizler;

pH: Her bir sıcaklıkta kurutulmuş meyve posaları belirli oranlarda sulandırıldıktan sonra laboratuvar koşullarında pH metre ile okuma yapılmıştır.

Titre edilebilir asit oranı (%): Sulandırılmış taze ve kurutulmuş armut posalarından, 5 mL alınarak 0.1 N NaOH çözeltisi ile ve bir pH metre yardımıyla titre edilmiştir. Titrasyon işlemi 3 paralelli olarak yapılarak, titrasyon sonuçlarının ortalamasından titre edilebilir asit miktarı % olarak saptanmıştır.

Tablo 2. Armut posasının kuruma performans değerleri

Kurutma sıcaklıkları	Ortalama son nem değerleri (%)	Kuruma süreleri (saat)
60 °C	% 10,15	24
65 °C	% 10,05	21
70 °C	% 11,00	12

[34]'de belirtilen çalışmaya göre, kuzukulağı bitkisini 40, 50 ve 60 °C sıcaklık ve 1 m/s-2 m/s hava hızları altında yaptığı kurutma çalışmasında sıcaklık ve hava hızının artmasıyla ürünün kuruma süresinin azaldığını ifade etmiştir. Benzer bulguları, [35-38]'de yapılan çalışmalarda tespit etmişlerdir.

Tablo 3. Page modeline ait bazı değerler

Kurutma sıcaklıkları	k	h	R ²	p
60 °C	0,0340	1,4120	0,9949	<0,0001
65 °C	0,0454	1,3819	0,9954	<0,0001
70 °C	0,1095	1,2796	0,9958	<0,0001

Tablo 4. Midilli-Küçük modeline ait bazı değerler

Kurutma sıcaklıkları	k	h	j	m	R ²	p
60 °C	1,2450	0,9962	0,0397	-0,0057	0,9990	<0,0001
65 °C	1,2175	0,9969	0,0523	-0,0061	0,9993	<0,0001
70 °C	1,1236	0,9993	0,1175	-0,0099	0,9991	<0,0001

Suda çözünebilir kuru madde (SÇKM) (%): Taze ve kurutulmuş armut posalarından rasgele seçilen örnekler pres ile suları çıkarılıp, suda çözünebilir kuru madde miktarları portatif hassas dijital (± 0.01) refraktometre ile okunmuştur [32-33].

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Kuruma değerleri

Kurutulan armut posasının su içeriği ortalama % 77.65 olarak belirlenmiştir. Ürünün kurutma şartları altındaki ortalama kuruma süreleri belirlenmiş ve kurutma sıcaklığının kuruma değerlerini değiştirdiği ve sıcaklığın yükselmesiyle kuruma değerlerinin azaldığı görülmüştür (Tablo 2).

3.2. Kuruma modellerine ait katsayılar, "R²" ve "p" değerleri

Armut posasının kuruması esnasında uzaklaşan su oranlarına ait değerleri modellemek için kuruma eğrileri belirlenmiştir. Modellerine ait katsayılar, güvenilirlik değerleri ve tahmin yakınlığını ifade eden R² değerleri Tablo 3., 4. ve 5.'te verilmiştir.

Tablo 5. Yağcıoğlu modeline ait bazı değerler

Kurutma sıcaklıkları	k	h	j	R ²	p
60 °C	1,5948	0,0446	-0,5740	0,9979	<0,0001
65 °C	1,5025	0,0563	-0,4835	0,9983	<0,0001
70 °C	1,3564	0,1088	-0,3452	0,9988	<0,0001

Page modeli kuruma eğrilerini en iyi 70 °C kurutma havası sıcaklığında tahmin ederken, Midilli-Küçük modeli, 65 °C kurutma havası sıcaklığında, Yağcıoğlu modeli ise kuruma eğrilerini en iyi 70 °C kurutma havası sıcaklığında tahmin etmiştir. Tahmin edilen tüm kuruma eğrilerinde modellerin güvenilirlik değerlerinin $p < 0.05$ olduğu yani kullanımlarının uygun bulunmuştur. Uygulanan modeller içerisinde ise en iyi tahmin edenin Midilli-Küçük olduğu tespit edilmiştir.

3.3. Renk değerleri

Kurutma materyaline ait renk ölçerle belirlenen renk değerleri kullanılarak ürünün rengi hakkında daha fazla bilgi veren hesaplanan değerleri hesaplanmıştır (Tablo 6).

Tablo 6. Ölçülen renk değerleri ve Duncan test sonuçları

Kurutma sıcaklıkları	L	a	b
Taze	41,61 ^a	5,08 ^b	17,37 ^c
60 °C	38,99 ^a	8,54 ^a	28,42 ^a
65 °C	31,93 ^b	8,72 ^a	23,24 ^b
70 °C	34,09 ^b	8,54 ^a	26,78 ^a

* Duncan testleri ($p < 0.05$) değerine göre yapılmıştır.

Tablo 6 'de renk değerlerine ait duncan test sonuçları verilmiştir. Polatçı ve Tarhan (2009), farklı kurutma şartlarının reyhan yapraklarının renk değerlerine olan

etkisini istatistiksel olarak farkı ifade edebilmek için duncan testini kullanmışlardır. Tablo 7. 'da ise taze kurutulmuş posaya ait hesaplanan ikincil renk değerleri verilmiştir.

Tablo 7. Hesaplanan ortalama renk değerleri

Kurutma sıcaklıkları	C	H°	ΔE	x	BI
Taze	18,10	73.71	-	-	-
60 °C	29,68	73,28	29,17	0.54	133.34
65 °C	24,82	69.44	23.92	0.54	137.05
70 °C	28,10	72.32	26.76	0.57	151.03

Tablo 6 'te taze posasının parlaklık (L) değerine göre kurutma havası sıcaklıklarında belirlenen tüm L değerleri uzaklaşmıştır. Tazeye göre parlaklık değeri en az 65 °C kurutma havası sıcaklığında korunduğu belirlenirken en az fazla korunmanın ise 60 °C kurutma havası sıcaklığında tespit edilmiştir. Bunun sebebinin ürünün kurutma sıcaklığının artmasıyla beraber düşük sıcaklık değerlerine göre daha hızlı kuruyarak renk değerlerini koruyamadığını ve düşük sıcaklık değerinde ise ürün uzun süre sıcaklığa maruz kaldığından dolayı parlaklık değerini muhafaza edemediği düşünülmektedir. Taze ürüne göre kurutulmuş ürünlerin kırmızılık değerlerinin tümünde bir artmanın olduğu ve kurutma sıcaklıklarında belirlenen kırmızılık değerleri arasında ise istatistiksel olarak önemli bir farklılık oluşmamıştır. Taze ürüne göre sarılık değerinin en az 60 ve

70 °C kurutma havası sıcaklığında korunduğu belirlenirken en fazla korunmanın ise 65 °C kurutma havası sıcaklığında belirlenmiştir.

Tablo 7 'ya göre piyasa değeri açısından önemli bir kırater olan kroma değeri açısından taze ürüne göre kurutulmuş ürünler kıyaslandığında tüm kurutma şartlarında kroma değerleri artmıştır. Ancak taze ürüne en yakın kroma değeri 65 °C kurutma havası sıcaklığında yapılan kurutma işleminde belirlenmiştir.

3.4. Kimyasal analiz değerleri

Taze ve kurutulmuş armut posasının pH, ŞÇKM ve T.A. değerleri belirlenmiştir (Tablo 8).

Tablo 8. Belirlenen ortalama pH, S.Ç.K.M ve T.A. değerleri ile Duncan test sonuçları

Kimyasal Özellikler	Kurutma sıcaklıkları			
	Taze	60 °C	65 °C	70 °C
SÇKM	2.47 ^b	2.33 ^c	2.33 ^c	2.70 ^a
pH	3.68 ^a	3.44 ^b	3.50 ^b	3.65 ^a
T.A.	1.16 ^b	1.68 ^a	1.23 ^b	1.10 ^b

Taze posaya göre kurutulan ürünlerin SÇKM değerlerinde artışın olduğu belirlenmiştir. Kurutulan ürünler içerisinde en yüksek SÇKM değerinin 26.58 ile 70 °C kurutma havası sıcaklığında belirlenmiştir. Taze ve kurutulmuş ürünlerin pH değerleri açısından incelendiğinde aralarında önemli bir değişikliğin olmadığı ve taze posaya göre en yakın pH değerinin 65 °C kurutma havası sıcaklığında belirlenmiştir. Titrde edilebilir asitlik değeri açısından taze ve kurutulmuş ürünler arasında bir artışın olduğu ve tazeye en yakın T.A. değerinin 65 °C kurutma havası sıcaklığında belirlenmiştir.

4. SONUÇ

Armut posası içerdiği hem besin değerleri hem de etken maddeleri açısından hayvan beslemesinde kullanılan önemli bir meyve posasıdır. Çalışmada, kabin tip bir konvektif kurutucu ile kurutulan armut posasına ait kuruma, renk, kuruma eğrileri, pH, SÇKM ve T.A. değerleri belirlenmiş ve bazı sonuçlara ulaşılmıştır;

- 1) Kurutma havası sıcaklık değerlerinin ürünün kurumasında etkili bir kriter olduğu ve sıcaklık değerinin artmasıyla kuruma süresinin azaldığı belirlenmiştir.
- 2) En uzun kurutma işleminin, 60 °C kurutma havası sıcaklığında 24 saat sürdüğü belirlenirken, en kısa kurutma işlemi ise, 70 °C kurutma havası sıcaklığında 12 saat sürdüğü belirlenmiştir.
- 3) Uygulanan ince tabakalı kurutma modelleri içerisinde en yüksek R² değeri Midilli-Küçük modeli olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle Midilli-Küçük modeli uygulanan ince tabakalı matematiksel kurutma eşitlikleri arasında kuruma eğrisini en iyi tahmin eden model olarak belirlenmiştir.
- 4) Ürünün piyasa değeri açısından önemli bir renk kriteri olan kroma değeri açısından, ürün rengi tazeye göre, 65 °C kurutma havası sıcaklığında kurutulmasının daha uygun olduğu tespit edilmiştir.
- 5) Kurutulan ürünlerin tazeye göre, incelenen kimyasal özellikleri açısından en uygun sıcaklığın 65 °C olduğu bulunmuştur.

Sonuç olarak armut posası konvektif bir kurutucu ile kurutulacaksa 65 °C kurutma havası sıcaklığının seçilmesi önerilmektedir.

KAYNAKÇA

[1].A.N. Da Silva, C.J.S. Dos Reis, F.M. Botelho, M.N. De Moraes, J.T. De Faria, T. Da Conceição, M. Bezerra, M.A.

Martins, and S.A.M. De Oliveira, "Pear drying Thermodynamics studies and coefficients of convective heat and mass transfer". International Journal Food Engineering 9(4): 365–374, 2013.

[2].I. Doymaz and O. Ismail, "Experimental characterization and modelling of drying of pear slices". Food Sci Biotechnol, 21(5):1377–1381, 2012.

[3].A. Soylu, "İlman İklim Meyveleri – II", Uludağ Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Ders Notları, Bursa, 2003.

[4].A. Itai, "Pear Genome Mapping and Molecular Breeding in Plants". Fruit and Nuts, 4:157-170, 2007.

[5].M. Pektaş, "Hasat Öncesi Bazı Bitki Büyüme Düzenleyici Madde (BBDM) uygulamalarının Akça ve B.P. Morettini Armutlarında (Pyrus communis L.) Meyve Kalitesi Üzerine Etkileri". Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 2009.

[6].A.G. Özyayın ve S. Özçelik, "Farklı Kurutma Koşullarının Bazı Önemli Armut Çeşitlerinin Mikrobiyolojik Kalitesi Üzerine Etkilerinin Araştırılması". Meyve Bilimi, ISSN: 2148-0036, 3 (1), 37-44, 2016.

[7].J. Chen, Z. Wang, J. Wu, Q. Wang and X. Hu, "Chemical compositional characterization of eight pear cultivars grown in China". Food Chem, 104 (1): 268–275, 2007.

[8].J. Salta, A. Martins, R.G. Santos, N.R. Neng, J.M.F. Nogueira, J. Justino and A.P. Rauter, "Phenolic composition and antioxidant activity of Rocha pear and other pear cultivars – A comparative study". Journal Functional Foods, 2(2): 153–157, 2010.

[9].S.C.R.V.L. Santos, R.P.F. Guine and A. Barros, "Effect of drying temperatures on the phenolic composition and antioxidant activity of pears of Rocha variety (Pyrus communis L.)". Food Measur, 8: 105–112, 2014.

[10].R.P.F. Guine, M.J. Barroca, F.J. Gonçalves, M. Alves, S. Oliveira and P.M.R. Correia, "Effect of drying on total phenolic compounds, antioxidant activity, and kinetics decay in pears". Int J Fruit Sci, 15: 173–186, 2015.

[11].F.A. Juhaimi, N. Uslu, M.M. Özcan, E.F.E. Babiker and K. Ghaffoor, "Effect of drying on antioxidant activity, total phenol and mineral contents of pear fruits". Journal of Food Safety and Food Quality, 67 (5),113–148, 2016.

[12].S. Kaur, B.C. Sarkar and H.K. Sharma, "Optimization of enzymatic hydrolysis pre-treatment conditions for enhanced juice recovery from guava fruit using response surface methodology". Food Bioprocess Technology, 2(1): 96–100, 2009.

[13].N. Kumar, B.C. Sarkar and H.K. Sharma, "Effect of air velocity on kinetics of thin layer carrot pomace drying". Food Science and Technology International, 17(5), 459-469, 2011.

- [14].P.S. Pisalkar, N.K. Jain and S.K. Jain, "Osmo-air drying of aloe vera gel cubes". Journal of food science and technology-mysore 48-2, 183-189, 2011.
- [15].G.E.G. Moreira, M.G.M. Costa, A.C.R. De Souza, E.S. De Brito, M.F.D. Medeiros and H.M.C. De Azeredo, "Physical properties of spray dried acerola pomace extract as affected by temperature and drying aids". LWT - Food Sci Tech, 42: 641-645, 2009.
- [16].U. Boylu, "Üzüm Posası Silajlarında Farklı Katkı Maddesi Kullanımının Fermentasyon Gelişimi Ve Bazı Mikrobiyolojik Parametreler Üzerine Etkileri". Fen bilimleri Enstitüsü, Zootekni Anabilim Dalı, Yüksek lisans Tezi, Tekirdağ, 2009.
- [17].P. Çilem, "Sosis Üretiminde Kurutulmuş Kayısı Posası Kullanımının Araştırılması". Ege Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim dalı Yüksek lisans tezi, İzmir, 2006.
- [18].F. Göğüş and M. Maskan, "Air drying characteristics of solid waste (pomace) of olive oil processing". Journal of Food Engineering 72, 378-382, 2006.
- [19].M. Smail, "Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer". Energy Conversion and Management, 5,2 1644-1649, 2011.
- [20].M.Y. Yalçınkaya, E. Baytok ve M.A. Yörük, "Değişik Meyve Posası Silajlarının Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri*". Erciyes Üniversitesi Veteriner Fakülte Dergisi, 9(2) 95-106, 2012.
- [21].A. Yağcıoğlu, Tarımsal Ürünleri Kurutma Tekniği. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi yayınları No: 536. Bornova, İzmir, 1999.
- [22].Ş. Karagül ve M. Taşova, "Determination of the Optimum Drying Method in Terms of Color Value of Cress (*Lepidium sativum* L.) Leaves Dried by Microwave Method with Pre-treatment and without Pre-treatment". Journal of New Results in Science, 6 (2), 24-31, 2017.
- [23].H. Polatçı ve M. Taşova, "Sıcaklık Kontrollü Mikrodalga Kurutma Yönteminin Alıç (*Crataegus* spp. L.) Meyvesinin Kuruma Karakteristikleri ve Renk Değerleri Üzerine Etkisi". Türk Tarım - Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5(10): 1130-1135, 2017.
- [24].M.K. Krokida, C.T. Kiranoudis, Z.B. Maroulis and D. Marinos Kouris, "Effect of pretreatment on color of dehydrated products". Drying Technology, 18(6), 1239-1250, 2000.
- [25].G. Adiletta, G. Iannone, P. Russo, G. Patimo, S. De Pasquale and M. Di Matteo, "Moisture migration by magnetic resonance imaging during eggplant drying: A preliminary study". International Journal of Food Science and Technology, 49, 2602-2609, 2014.
- [26].R.G. McGuire, "Reporting of objective color measurements". HortScience, 27, 1254 - 1255, 1992.
- [27].J. Lopez, A. Vega Galvez, M.J. Torres, R. Lemus Mondaca, I. Quispe Fuentes, and K. Di Scala, "Effect of dehydration temperature on physico-chemical properties and antioxidant capacity of goldenberry (*Physalis peruviana* L.)". Chilean Journal Of Agricultural Research 73(3), 293-300, 2013.
- [28].M.T. Çakır, "Güneş Enerjisinden Yararlanarak Tarım Ürünlerinin Kurutulması". Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1(1), 41-56, 2015.
- [29].A. Vega Galvez, K. Ah Hen, M. Chacana, J. Vergara, J. Martinez Monzo, P. Garcia Segovia, R. Lemus Mondaca, and K. Di Scala, "Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices". Food Chemistry, 132, 51-59, 2012.
- [30].M. Taşova ve M. Güzel, "İstanbul Çeşidi Vişnenin (*Prunus cerasus* L.) Fiziko-Mekanik Özellikleri İle Renk Değerlerinin Belirlenmesi". Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 6, Özel sayı, 1130-1135, 2017.
- [31].E. Plou, A. Lopez-Malo, G.V. Barbosa-Canovas, J. Welti-Chanes and B.G. Swanson, "Polyphenoloxidase activity and color of blanched and high hydrostatic pressure treated banana puree". Journal of Food Science, 64, 42-45, 1999.
- [32].İ. Karaçalı, "Bahçe Ürünlerinin Muhafazası ve Pazarlanması". 413s, Bornova- İzmir, 1990.
- [33].B. Cemeröglü, "Meyve ve Sebze İşleme Endüstrisinde Temel Analiz Metodları". Biltav Yay. 381s. Ankara, 1992.
- [34].F. Açıkgöz Eryılmaz, "Kuzukulağı (*Rumex acetosa* L.) Bitkisinin Farklı Kurutma Yöntemleri Kullanılarak Kurutulması Ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi". Namık Kemal Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi, (Proje No: NKUBAP.00.MB.AR.15.01), 2015.
- [35].H. Polatçı and S. Tarhan, "The Effect of Different Drying Methods on Drying and Quality of Reyhan (*Ocimum basilicum*) Plant. GOI. Journal of Agricultural Faculty, 26 (1), 61-70, 2009.
- [36].M. Taşova, "Düşük ve Yüksek Sıcaklıklarda Kurutulan Patlıcan (*Solanum melongena* L.) Dilimlerinin Kurutma Kinetiği ve Renk Değerleri Açısından En Uygun Kurutma Sıcaklığının Belirlenmesi". Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2018. 11(2), Syf: 84-93, 2018.
- [37].G. Ergüneş ve M. Taşova, "Kabin kurutucuda kurutulan kuşburnu (*Rosa canina* L.) meyvesinin kuruma performansı, efektif difüzyon ve aktivasyon enerjisi değerlerinin belirlenmesi". Akademik Ziraat Dergisi, Cilt 7, Sayı 1, Syf: 75-82, 2018.
- [38]. H. Polatçı, M. Taşova, O. Sarçoğlu ve O. Taşkın, "Şeftali (*Prunus persica* L.) Posasının Farklı Sıcaklıklarda Kuruma Parametrelerinin Belirlenmesi". Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 14 (3), Syf: 149-156, 2018.



Whale Optimization Algorithm for Numerical Constrained Optimization

*¹Yuksel Celik, ²Alper Talha Karadeniz

¹Karabuk University, Karabuk/Turkey, yukselcelik@karabuk.edu.tr

²Bolu Abant Izzet Baysal University, Bolu/Turkey, alperkaradeniz@ibu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 09.04.2019

Kabul Tarihi: 24.04.2020

Abstract

Whale Optimization Algorithm (WOA), WOA is a recently developed, nature-inspired, meta-heuristic optimization algorithm. The algorithm was developed in 2016, inspired by bubble hunting strategies used by humpback whales. To determine the performance of each optimization algorithm developed, they should be tested on a different type of optimization test problems. In this paper, we aim to investigate and analyse WOA logarithm on constrained optimization the performance and accuracy of the proposed method are examined on 13 (G1-G13) constrained numerical benchmark functions, and the obtained results are compared with other meta-heuristic optimization algorithms which taken from the literature. The experimental results show that WOA has low performance on constrained optimization.

Keywords – Whale optimization algorithm, meta-heuristic algorithm, Constrained Optimization

1. INTRODUCTION

Optimization algorithms are used frequently for solving many problems [1]. The optimization is a mathematical discipline that aims to find the minimum or maximum value of an equation. For the solution of the optimization systems, heuristic methods are used along with the mathematical methods [2]. In literature, the term Meta-Heuristic is formed by the combination of the terms Meta and Heuristic and is defined as a whole of methods that solves problems through some rules and procedures [3]. Some of the heuristic techniques studied frequently in the literature are Artificial Neural Networks (ANN), Genetic Algorithm (GA), Ant Colony Optimization (ACO), Simulated Annealing (SA), Tabu Search and Particle Swarm Optimization (PSO). Some of the more recent or less studied meta-heuristics are Bee Colony Algorithm (BCA), Harmonic Search Algorithm and Kangaroo Algorithm [4]. The optimization algorithm developed needs to be tested in order to measure its performance. In the performance measurement of optimization algorithms, Traveling Salesman Problem, Unconstrained Test Problems and Constrained Test Problems are used [1]. Restricted test problems are frequently used and difficult to solve mathematical problems in applications such as engineering applications, structural optimization and allocation problems. For academics, it is very important to solve problematic problems efficiently [5]. Several different meta-heuristic methods have been proposed in the literature to solve different problem types. In the studies carried out, it

is seen that meta-heuristic methods generate better results, in large-scale problems in particular. One of the recently developed meta-heuristical algorithms is the WOA. The whale optimization algorithm is a new optimization method proposed by Mirjalili and Lewia in 2016. The WOA method was tested with 29 different mathematical problems and the results of the tests showed that it could compete with other optimization algorithms [6]. This study is inception and different studies in relation to WOA are available in the literature. Experimental studies were performed on the breast cancer data set of WOA and successful results were obtained [7]. One of the data set studies where WOA is used is the problem of selecting the attributes in the datasets. In this study, the WOA was compared to the particle swarm optimization algorithm and it was demonstrated that it had performed better [8]. Saidala and Devarakonda conducted another data set study where WOA was used in 2017. Enron-Spam data set with high similarity value was selected as the data set. For the comparison, linear, quadratic, polynomial and RBF methods were used. According to all results obtained by evaluating the results concerning precision, accuracy, recall and F-values, it is seen that the values generated by WOA are competitive with other methods [9]. The WOA method was also used to aggregate the data of MR images taken for the liver. Concerning experimental results, it was confirmed that the WOA method had a higher predictive value [10]. The WOA method was used to train artificial neural networks on 20 different data sets. The method was compared to back-propagation learning algorithm and six

*Corresponding Author: Karabuk University, Karabuk/Turkey, yukselcelik@karabuk.edu.tr

evolutionary algorithms in terms of training and, it was confirmed that WOA had superior performance over existing algorithms in terms of both local optimal value avoidance and convergence rate [11]. In this study, we implemented and applied constrained optimization on WOA then analysed performance and accuracy on several constrained numerical benchmark function optimizations [12]. The rest of the paper is structured as follows. Section 2 describes the WOA algorithm in detail. Section 3 presents constrained optimization and test functions. Experimental studies are reported and discussed in Section 4. Finally, some conclusions are drawn in Section 5.

2. WHALEOPTIMISATION ALGORITHM

The whale optimization algorithm is one of the meta-heuristic algorithms developed based on the bubble-net hunting strategy of humpback whales [6]. Humpback whales are usually fed by small schools of fish near the water surface. Humpback whales create air bubbles when approaching the prey to keep their prey together as well as to allow them to approach the prey without being seen [13]. The hunting strategy of humpback whales is shown in Figure 1 [6].



Figure 1. Hunting of humpback whales

The whale optimization algorithm is fundamentally composed of 3 parts. These parts are encircling prey, Bubble Net Attacking and Search for Prey [6].

2.1. Encircling Prey

Humpback whales can recognize the location of the prey and encircle them. As the best solutions not known a priori in the optimization problems, the best solution or a point close to the best solution is considered the best solution. After the best solution is defined, the positions of the other solutions are updating accordance with the best [6]. The mathematical model of the encircling behaviour of the whales is presented in Equations 1 and 2 below [6].

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^* - \vec{X}| \quad (1)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^* - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2)$$

Where t represents the current iteration, \vec{A} and \vec{C} the coefficient vectors, and \vec{X}^* the best solution vectors.

Calculation of the vectors \vec{A} and \vec{C} are demonstrated in Equations 3 and 4 [6].

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (3)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (4)$$

Where a represents the vector linearly decreased from 2 to 0 during the iteration, and rather random vectors [6].

2.2. Bubble Net Attacking Method

The algorithm approaches, after the prey is located, the prey in two different moves, namely Shrinking Encircling Mechanism and Spiral Updating Position. Spiral Updating Position and the locations of the whales are modelling Figure 2 [6].

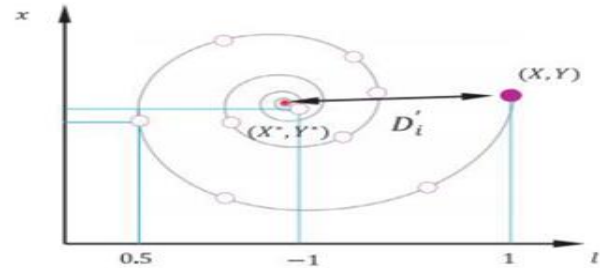


Figure 2. Spiral move

The mathematical formula for figuring out the difference between the best agent and the search agent for the spiral movement is shown in Equation 5 [6]. In Equation 6, it is demonstrated that \vec{D}^s is the difference between the best search agent and the existing search agent [6].

$$X(t+1) = \vec{D}^s \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^* \quad (5)$$

$$\vec{D}^s = \vec{X}^* - \vec{X} \quad (6)$$

Where b indicates the constant for logarithmic spiral, and l is a random number in the range of $[-1, 1]$. The points around the best search agent are positioned through coefficients \vec{A} and \vec{C} .

When whales move towards their prey, they chose either one of the linear moves or spiral moves. In WOA, which one of these linear moves or the spiral moves to be chosen is performed in a 50% probability, as shown in Equation 7 [6].

$$X^s(t+1) = \begin{cases} X^s(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}^s & p < 0,5 \\ \vec{D}^s \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X^s(t) & p \geq 0,5 \end{cases} \quad (7)$$

Where p is a randomly produced number between $[0, 1]$.

2.3. Search for Prey

Whether a Global or a Local search is to be carried out is decided considering the value of the vector \vec{A} . In cases where $\vec{A} > 1$ or $\vec{A} < -1$, it is considered a Global Search, because in these cases the points farther away from the best points can be chosen. The mathematical modelling is shown in Equations 8 and 9 [6].

$$\vec{D}^r = \vec{C} \cdot \vec{X}rand - \vec{X} \quad (8)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}rand - \vec{A} \cdot \vec{D}^r \quad (9)$$

The $\vec{X}rand$ shown in Equations 8 and 9 indicates a randomly selected search agent.

The pseudo code of the Whale Optimisation Algorithm is given in Figure 3 [6].

```

Initialize the population  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Calculate the fitness of each search agent
 $X^*$  = the best search agent
while ( $t < \text{Max \#iterations}$ )
for (each search agent)
Update  $a, A, C, l$  and  $p$ 
    if ( $p < 0.5$ )
        if ( $|A| < 1$ )
Update the position of the current search agent in equation (1)
        else if ( $|A| \geq 1$ )
            Select a random search agent ( $X_{\text{rand}}$ )
            Update the position of the current search agent in equation (9)
        end if
    else if ( $p \geq 0.5$ )
        Update the position of the current search by the equation (5)
    end if
end for
Assign limit values for individuals getting out of boundaries
Calculate the value of the objective function
Update search agent if there is a better solution
 $t=t+1$ 
end while
return  $X^*$ 
    
```

Figure 3. Pseudo code of WOA

3. CONSTRAINED OPTIMIZATION PROBLEMS

In order to observe the comparative performances of the algorithms proposed to solve real-world problems, they need to be tested with the test problems frequently used in the literature. One of them is numerically constrained optimization problems. Constrained optimization problems play an important role in the determination of challenging test performance of optimization algorithms [13]. It is extremely The results of the empirical tests are presented in Table2.

Table 2. Test results of WOA. “/” indicates values for which no solution was obtained.

Problem	Optimum	Best	Worst	Average	Standard Deviation
G1	-15	-15	-6	-11.9097	2.5033852
G2	-0.803619	/	/	/	/
G3	-1.000500	0	0	0	0
G4	-30665.539	-30587.303	-29313.357	-30102.268	238.19937
G5	5126.4981	/	/	/	/
G6	-6961.81388	-6961.42989	-6945.91212	-6958.47643	3.1177653
G7	24.306	28,630	79.259	43.992	12.049
G8	-0.095825	-0.095825	-0.095825041	-0.095825041	1.17591E-10
G9	680.6300573	683.6303371	762.4505978	704.8788225	18.48857643
G10	7049.248	8977.340	1.29993E+14	1.46376E+13	3.62535E+13
G11	0,75	1	1	1	0
G12	-1	-0.988	-0.845	-0.934	0.036
G13	0.0539498	/	/	/	/

When the test results of WOA in Table 2 are analysed, it is seen that the optimum value was reached in G1 and G8, optimum value was considerably converged in G4, G7, G9 and G12, the

difficult to solve such problems [1]. This difficulty originates from the attempt to find solutions within the region permitted by the constraints, due to the structure of the problems [1]. In this study, 13 constrained test functions, which are frequently used in literature, were selected and the details are shown in Table 1 [12].

Table 1. Detailed comparison of test functions

Problem	n	Type of Objective Function	p	$f(x^*)$
G01	13	quadratic	0.0111%	-15.0000000000
G02	20	nonlinear	99.9971%	-0.8036191042
G03	10	polynomial	0.0000%	-1.0005001000
G04	5	quadratic	51.1230%	-30665.5386717834
G05	4	cubic	0.0000%	5126.4967140071
G06	2	cubic	0.0066%	-6961.8138755802
G07	10	quadratic	0.0003%	24.3062090681
G08	2	nonlinear	0.8560%	-0.0958250415
G09	7	polynomial	0.5121%	680.6300573745
G10	8	linear	0.0010%	7049.2480205286
G11	2	quadratic	0.0000%	0.7499000000
G12	3	quadratic	4.7713%	-1.0000000000
G13	5	nonlinear	0.0000%	0.0539415140

4. EMPIRICAL TESTS

At the empirical tests of the WOA algorithm in this study, the iteration number of the G1-G13 constrained test problems was 500 and the problem coefficient (number of repeats) was 30.

values too far from the optimum value were obtained in G3, G6, G10 and G11, and no results were produced in G2, G5 and G13.

4.1. Penalty Function

Penalty function is a method used to solve constrained optimization problems. Constrained problems are multiplied by a penalty parameter to the extent of the violation of the restriction and added to the current value. In this way, the individual outside the boundaries is included in the problem solving again from a remote location [14]. Penalty function method pseudo code is shown in Figure 4.

```

Constraint Function
Penalty = 10^15
For i=1 to #inequality
    If inequality check result = true
        Objval = Objval + Penalty
    End If
End for
For i=1 to #equality
    If equality check result = true
        Objval = Objval + Penalty
    End If
End for
    
```

Figure 4. Pseudo code of Penalty Function

In the experimental studies conducted, the average test results of WOA and Non Penalty Whale Optimization Algorithm (NPWOA) were compared and shown in Table 3.

As seen in Table 3, WOA gave much better results than NPWOA. Because the penalty function multiplies the values that do not match the constraint by a high number and does not allow bad results to be included in the solution. Penalties are not used in the algorithm, bad results are resolved, preventing

Table 4. Comparison of the Best Values of the algorithms.

Pro	Opt	GA	ABC	PSO	FA	BA	WOA
G1	-15	-14.44	-15	-15	-12.432	-15	-15
G2	0.803619	0.796231	0.80360	0.8033	-0.803619	0.8036191	/
G3	1	0.99	1	1	-1	0.99998	0
G4	-30665.53	-30626.053	-30665.539	-30665.5	-30378.381	-30665.539	-30587.303
G5	5126.498	/	5126.484	/	5126.497	5126.498	/
G6	-6961.814	-6952.472	-6961.814	-6961.7	-6961.811	-6961.813	-6961.429
G7	24.306	31.097	24.330	24.442	24.307	24.306	28.630
G8	0.095825	0.095825	0.09583	0.09583	0.095825	0.095825	0.095825
G9	680.63	685.994	680634	680.657	680.63	680.630	683.63
G10	7049.25	9079.77	7053904	7131.01	7072.41	7049.26	8977.34
G11	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	1
G12	1	1	1	1	-1	1	-0.98
G13	0.05395	0.13405	0.76	/	0.054	0.0539499	/

Comparison of the best values of the algorithms given in Table 4 is presented in Table 5. The (+) sign was used to demonstrate the results with better or equal values, (-) for the worse results and (/) for no results.

going to good value, and at some point, it makes the solution impossible by attaching to the local best. Based on the tests and information, we can say that it is very important to use the penalty function in constrained optimization problems.

Table 3. Comparison of Average Values of WOA and NPWOA

Pro	Opt	WOA	NPWOA
G1	-15	-11.909	-306
G2	0.803619	/	/
G3	1	0	1,98
G4	-30665.53	-30102.26	-32217.04
G5	5126.498	/	0
G6	-6961.814	-6958.476	-7973
G7	24.306	43.992	-24
G8	0.095825	-0.095825	/
G9	680.63	704.8788225	6.903
G10	7049.25	1.46376E+13	/
G11	0.75	1	0
G12	1	-0.934	/
G13	0.05395	/	/

4.2. Empirical Test Result and Compared

The test results obtained were compared with GA, ABC, PSO, FA and BA. Comparison of said algorithms with WOA in Table 4. [15] [16] [5] [17] [18].

Table 5. Comparison of best values of algorithms.

Pro	GA-WOA		ABC-WOA		PSO-WOA		FA-WOA		BA-WOA	
G1	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+
G2	+	/	+	/	+	/	+	/	+	/
G3	+	-	+	-	+	-	+	+	+	-
G4	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-
G5	/	/	+	/	/	/	+	/	+	/
G6	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-
G7	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-
G8	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+
G9	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-
G10	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-
G11	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
G12	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-
G13	+	/	+	/	/	/	+	/	+	/
Total	7	6	12	2	10	2	10	5	13	2

When data of the best test results in Table 5 are analysed, WOA has 17 better (+) results in total. This indicates that WOA has a competitive structure, however, the other algorithms result

better in most of the constrained test problems.

In Table 6, a comparison of the worst values of the algorithms used for the performance evaluation of the WOA is presented.

Table 6. Comparison of the worst values of algorithms.

Pro	Optimal Value	GA [5]	ABC [15]	PSO [16]	BA [17]	WOA [18].
G1	-15	-14.015	-15	-15	-12.45309	-6
G2	0.803619	0.77914	0.7703	0.6316	0.5625529	/
G3	1	0.956	1	1	0.93641	0
G4	-30665.539	-30567.105	-30665.5390	-30665.5	-30665.539	-29313.3576
G5	5126.498	/	5374.4300	/	5181.4744	/
G6	-6961.814	-6784.255	-6961.8130	-6956.8	-6961.81388	-6945.912123
G7	24.306	38.686	24.8350	31.1843	24.30799	79.25964946
G8	0.095825	0.095723	0.0958	0.09583	0.095825	0.095825
G9	680.63	698.297	680.641	681.675	680.630	762.450
G10	7049.25	11003.533	7493.9430	8823.56	7051.7822	/
G11	0.75	0.752	0.7500	0.75	0.750000012	1
G12	1	0.999	1	1	1	-0.845586734
G13	0.05395	/	1	/	0.0539723	/

For the comparison and interpretation of the worst values of the algorithms given in Table 5, Table 6 was created. The (+) sign in Table 7 was used to demonstrate the results with

better or equal values, (-) for the worse results and (/) for no results.

Table 7. Comparison of the worst values of algorithms.

Pro	GA-WOA		ABC-WOA		PSO-WOA		BA-WOA	
G1	+	-	+	-	+	-	+	-
G2	+	/	+	/	+	/	+	/
G3	+	-	+	-	+	-	+	-
G4	+	-	+	-	+	-	+	-
G5	/	/	+	/	/	/	+	/
G6	+	-	+	-	+	-	+	-
G7	+	-	+	-	+	-	+	-
G8	-	+	-	+	-	+	+	+
G9	+	-	+	-	+	-	+	-
G10	+	/	+	/	+	/	+	/
G11	+	-	+	-	+	-	+	-
G12	+	-	+	-	+	-	+	-
G13	+	/	+	/	/	/	+	/
Total	11	1	12	1	10	1	13	1

When the results of the comparison in Table 7 are analysed, WOA has 4 better (+) result values. In a comparison of the worst values, WOA obtains results less successful than other

algorithms. In Table 8, a comparison of the average values of the said algorithms is presented [15] [16] [5] [17] [18].

Table 8. Comparison of average values of algorithms.

Pro	Opt	GA	ABC	PSO	FA	BA	WOA
G1	-15	-14.236	-15	-15	-10.161	-14.658	-11.909
G2	0.803619	0.788588	0.7924	0.7521	-0.782942	0.75347	/
G3	1	0,976	1	1	-1	0.98955	0
G4	-30665.539	-30590.455	-30665.5390	-30665.5	-30259.518	-30665.539	-30102.26858
G5	5126.498	/	5185.7140	/	5126.835	5129.4248	/
G6	-6961.814	-6872.204	-6961.8130	-6960.7	-6961.786	-6961.8138	-6958.476433
G7	24.306	34.98	24.473	26.71	24.311	24.306	43.992
G8	0.095825	0.095799	0.0958	0.09583	-0.095825	0.095825	-0.095825
G9	680.63	692.064	680.64	680.876	680.63	680.63	704.878
G10	7049.25	10003.225	7224.4070	7594.65	7388.856	7049.4713	1.46376E+13
G11	0.75	0.75	0.7500	0.75	0.75	0.75	1
G12	1	1	1	1	-1	1	-0.9349
G13	0.05395	/	0.9680	/	0.252	0.053952	/

For the comparison and interpretation of the average values of the algorithms given in Table 8, Table 9 was created. The (+) sign in Table 9 was used to demonstrate the results with better or equal values, (-) for the worse results and (/) for no results. With reference to the comparison value in Table 9, WOA has 9 better (+) values. In consequence of the comparison of the average values of the algorithms, it is seen that WOA results worse than other algorithms, however, has a competitive structure. As a result of the tests, it is seen that WOA obtains no results in problems G2, G5 and G13, it

reaches the optimum value in problems G1 and G8, it is considerably close to the optimum value in problems G4, G6, G9 and G12, and the optimum value is reached in problems G3, G7, G10 and G11.

The best values, worst values and average values of the said algorithms were compared to that of WOA. It is seen that WOA generates 17 better results in comparison of the best values, 4 better results in comparison of the worst values and in 9 better results in comparison of the average values

Table 9. Comparison of average values of algorithms.

Pro	GA-WOA		ABC-WOA		PSO-WOA		FA-WOA		BA-WOA	
G1	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-
G2	+	/	+	/	+	/	+	/	+	/
G3	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-
G4	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
G5	/	/	+	/	/	/	+	/	+	/
G6	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-
G7	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
G8	-	+	-	+	-	+	+	+	-	+
G9	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
G10	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
G11	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
G12	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-
G13	/	/	+	/	/	/	+	/	+	/
TOTAL	9	2	12	1	10	1	10	4	12	1

5. CONCLUSION AND DISCUSSION

Meta-heuristic algorithms are now widely used in many fields. WOA is one of the recently proposed meta-heuristic algorithms inspired by the hunting strategy of humpback whales. In this study, we proposed a constrained WOA and applied well know 13 constrained numeric optimization test functions. The experimental results were compared with well-known similar meta-heuristic algorithms GA, ABC, PSO, FA, and BA algorithms to demonstrate the performance of WOA. The problems between the G1 and G13 were used for the comparison out of the constrained test problems.

The experimental results conducted over 13 constrained benchmark functions indicate that the OWA demonstrated has not well capabilities related to accuracy, robustness, and efficiency on constrained optimization.

Our future work will improve and modify OWA research mechanism and try again on different optimization benchmark functions.

REFERENCES

- [1] Y. Çelik, *Optimizasyon problemlerinde bal arıları evlilik optimizasyonu algoritmasının performansının geliştirilmesi*, Konya: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 2013.
- [2] A. Govan, *Introduction to Optimization*, Carolina State: Carolina State University SAMSI NDHS Undergraduate workshop, 2006.
- [3] A. Aydın, *Metasezgisel Yöntemlerle Uçak Çizelgeleme Problemi Optimizasyonu*, İstanbul: Marmara Üniversitesi Doktora Tezi, 2009.
- [4] O. Engin, M.C. Akkoyunlu, "Kesikli harmoni arama algoritması ile optimizasyon problemlerinin çözümü, Literatür araştırması," *S.Ü. Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 26, no. 4, 2011.
- [5] N. Bacanin, M. Tuba, "Improved seeker optimization algorithm hybridized with firefly algorithm for constrained optimization problems," *Elsevier*, pp. 197-207, 2014.
- [6] A. Lewis, S. Mirjalili, "The Whale Optimization Algorithm," *Advances in Engineering Software*, pp. 51-67, 2016.
- [7] R. Özdağ, M. Canayaz, "Data Clustering Based on the Whale Optimization," *Middle East Journal of Technic*, vol. 2, no. 1, 2017.
- [8] M. Demir, M. Canayaz, "Balina Optimizasyon Algoritması ve Yapay Sinir Ağı ile Öznitelik Seçimi," in *Artificial Intelligence and Data Processing Symposium*, Malatya, 2017.
- [9] N. Devarakonda, R. Saidala, "Bubble-Net Hunting Strategy of Whales based Optimized feature selection for E-mail Classification," in *2nd International Conference for Convergence in Technology*, 2017.
- [10] A. Mostafa, H. Hefny, M. Houseni, A. Hassanien, "Liver segmentation in MRI images based on whale optimization algorithm," *Multimedia Tools and Applications*, no. 76, p. 24931-24954, 2017.
- [11] I. Aljarah, H. Faris, S. Mirjalili, "Optimizing connection weights in neural networks using the whale optimization algorithm," *Soft Computing*, vol. 22, pp. 1-15, 2016
- [12] J. Liang,, T. Runarsson, E. Mezura-Montes, M. Clerc, P. N. Suganthan, A. Coello, K. Deb, "Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2006 Special Session on Constrained Real-Parameter Optimization," Indian Institute of Technology, Kanpur, 2006.
- [13] A. Goldbogen, S. Friedlaender, J. Calambokidis, F. McKenna, M. Simon, P. Nowacek, "Integrative Approaches to the Study of Baleen Whale Diving Behavior, Feeding," *BioScience*, vol. 2, no. 63, pp. 90-100, 2013.
- [14] X.-S. Yang, *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*, Luniver Press, 2010.
- [15] B. Akay, D. Karaboga, "A modified Artificial Bee Colony (ABC) algorithm for constrained optimization

problems,” *Applied Soft Computing*, vol. 11, pp. 3021-3031, 2011.

[16] S. Talatahari, Xin-She Yang, “Bat algorithm for constrained optimization tasks,” *Neural Comput, Applic*, p. 239–1255, 2013.

[17] J. Zeng, J. Pan, C. Sun, “An improved vector particle swarm optimization for constrained optimization problems,” *Information Sciences*, no. 181, p. 1153–1163, 2011.

[18] C. Coello, E. Mezura-Montes, “A Simple Multimembered Evolution Strategy to Solve Constrained


Optimization Problems,” *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, no. 9, 2005.

[19] L. Gao, D. Zoua, H. Liu, S. Li, “A novel modified differential evolution algorithm for constrained optimization problems,” *Computers and Mathematics with Applications*, no. 61, pp. 1608-1623, 2011.


[20] G. Jia, Y. Wang, Z. Cai, Y. Jin, “An improved ($\mu + \lambda$)-constrained differential evolution for constrained optimization,” *Information Sciences*, vol. 222, pp. 302-322, 2013.

Dinamik Simülasyonlarda Bölüntünün Geometrik Şeklinin Basınç Davranışına Etkisinin Araştırılması


*¹Hasan Hacıosmanoğlu, ²Gökhan Sevilgen, ³Emre İsa Albak

¹BMC Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş., İzmir, Türkiye, haciosmanoglu.hasan@gmail.com, 

²Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği, Bursa, Türkiye,

gsevilgen@uludag.edu.tr, 

³Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği, Bursa, Türkiye,

emrealbak@uludag.edu.tr, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 12.02.2020

Kabul Tarihi: 27.05.2020

Öz

Bu makalede, LS-DYNA sonlu elemanlar çözücüsü kullanılarak gerçekleştirilen dinamik simülasyonlarda, bölüntünün geometrik şeklinin, basıncın havadaki ilerleyişine ve büyüklüğüne etkisi incelenmiştir. İncelenen geometrik şekiller kübik, silindirik ve küresel olarak seçilmiştir. Dinamik simülasyonu modellemek için ALE metodu kullanılmıştır. Hedef bir noktadaki pik basınç değerleri, test sahasındaki dinamik testten elde edilen değer ile kıyaslanmıştır. Son olarak çalışmada belirtilen koşullarda hangi bölüntünün geometrik şeklinin daha doğru sonuçlar verebileceği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dinamik simülasyon, Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) yöntemi, sonlu elemanlar analizi, LS-DYNA

Investigation of the Effect of Mesh Geometric Shapes on Pressure Behavior in Dynamic Simulations

*¹Hasan Hacıosmanoğlu, ²Gökhan Sevilgen, ³Emre İsa ALBAK

¹BMC Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş., İzmir, Turkey, haciosmanoglu.hasan@gmail.com

²Uludağ University, Engineering Faculty, Dept. Of. Automotive Engineering, Bursa, Turkey, gsevilgen@uludag.edu.tr

³Uludağ University, Engineering Faculty, Dept. Of. Automotive Engineering, Bursa, Turkey, emrealbak@uludag.edu.tr

Abstract

In this paper, the effect of the geometrical shapes of the mesh on the progress of pressure wave and magnitude was investigated in the dynamic simulations by using LS-DYNA finite element solver. Cubic, cylindrical and spherical geometrical shapes were chosen to be examined. ALE() method was carried out to model dynamic simulation. Peak pressure values at a target point were compared with the value obtained from the dynamic test in the test area. In conclusion, it was investigated that which mesh geometric shape could give more accurate results under the conditions specified in the study.

Keywords: Dynamic simulation, Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE), Finite Element Analysis, LS-DYNA

1. GİRİŞ

Günümüzde, askeri alanda artan tehditlere karşı yapıların/askeri araçların koruma yeteneklerini artırmak amacıyla dinamik simülasyonlar yapılmaktadır. Dinamik yüklerinin hesaplanması için en bilinen yöntemlerden bir tanesi, LS-DYNA sonlu elemanlar kodu içerisinde bulunan Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) yöntemidir [12]. Bu yöntemde, enerji kaynağı ve hava Euler tipi elemanlarla

modellenirken, hedef yapı Lagrange tipi elemanlarla modellenir. Enerji kaynağında açığa çıkan enerji, hava içerisinde ilerleyerek [10,11] ilgili kontak algoritmaları [15] yardımıyla hedef yapıya iletilir.

Z. S. Tabatabaei [6] ve arkadaşları çalışmalarında, test sahasında beton panellere gelen dinamik yükün etkilerini incelerken enerji kaynağının oluşturduğu açık hava basıncını da ölçerek analiz çalışmaları ile karşılaştırmışlardır. S. A.

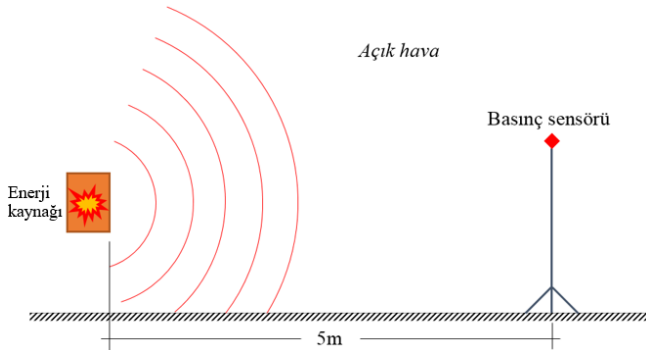
Kilic [5] ve arkadaşları çalışmalarında, eleman çözünürlüğü, eleman topolojisi ve katı sıvı etkileşim parametrelerini incelemişlerdir. Simülasyon sonuçlarını Conwep yöntemi ile kıyaslamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre küresel geometriye sahip hava hacmi ile ALE yöntemini kullanarak tam araç üzerinde dinamik yüklenme analizi gerçekleştirmişlerdir. W. Xiao [7] ve arkadaşları çalışmalarında farklı konfigürasyonlardaki beton duvarların şok dalgasına karşı dayanımlarını, ALE metodu kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada duvar arkasında kalan bölgedeki basınç değerlerini, LS-DYNA sonlu elemanlar kodu kullanılarak gerçekleştirilen dinamik analizler ile belirlemiş ve test sonuçları ile kıyaslamışlardır.

Bu çalışmada bir enerji kaynağından ortaya çıkan basınç dalgasının ilerleyişi hem nümerik olarak hem de deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında diğer çalışmalardan farklı olarak, hava hacmine ait geometrik şeklin kendi başına şok dalgasının ilerleyişine ve şiddetine etkisi incelenmiştir. Son olarak sonuçlar test ölçümü ile kıyaslanarak değerlendirme ve çıkarımlar yapılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Deneysel Çalışma

Deney çalışması, dinamik etkileri dış etkilerden arındırmak için açık havada ve açık arazide gerçekleştirilmiştir. Enerji kaynağı Şekil 1'de gösterildiği gibi, yerden 1 m yükseklikte konumlandırılmıştır. Basınçölçer sensör ise, enerji kaynağından yatayda 5 m uzaklığa konumlandırılmış olup, yerden yüksekliği, yer düzlemine çarparak oluşacak yansıma basıncından etkilenmemesi için enerji kaynağından daha yükseğe konumlandırılmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneği şematik gösterimi

2.2. Arbitrary Lagrangian-Eulerian Çözüm Metodu

LS-DYNA sonlu elemanlar kodu içerisindeki ALE metodu, dinamik simülasyon modellerinde sıklıkla kullanılan bir metottur [7,8]. Enerji kaynağı ve hava hacimleri, Euler tipi üç boyutlu elemanlarla modellenir ve ortak düğüm noktaları ile birbirlerine bağlıdır. Enerji kaynağı ve hava hacimleri, Euler formülasyonundan dolayı akışkan özellik göstermektedir. ALE yönteminde akışkan-katı (FSI) etkileşimleri gözlemlenebilmektedir [3,13]. Katı komponentler Lagrange tipi elemanlarla modellenirler ve akışkan hacimlerin içerisinde gömülü halde bulunmalarına karşın herhangi bir ortak düğüm noktaları bulunmamaktadır. Akışkanın yarattığı etkiler kontak algoritmaları ile katı

yapıya iletilir [14]. Lagrange ve Euler tipi yapıların birbiriyle olan karşılıklı karşılıklı etkileşimleri *ALE_MULTI_MATERIAL_GROUP kartı ile sağlanmaktadır [8].

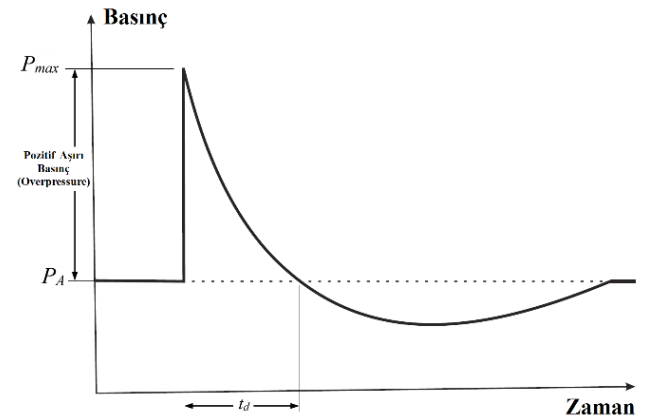
Yüksek enerjili kaynağın oluşturduğu basınç dalgası, enerji kaynağının malzeme modelinde tanımlanan hızda enerji kaynağı hacminde ilerler. Basınç enerji kaynağı-hava sınırına ulaştığında ortak düğüm noktaları vasıtası ile hava hacmine aktarılır ve ilerleyişine hava hacminde devam eder. Hedef yapı ile basınç dalgası etkileşimi LS-DYNA kodunda bulunan *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID fonksiyonu ile sağlanmaktadır. Akışkan-katı etkileşimi *penalty formülasyonu* temeline dayanmaktadır [1].

2.3. Basınç Dalgası

Açık havada gerçekleştirilen bir dinamik yüklemde, bir noktadaki basınç değerinin zamana bağlı olarak değişimi incelendiğinde, şok dalgası sebebiyle ani ve dik bir artışın ardından eksponansiyel eğri benzeri bir azalış göstermektedir. Kısa bir süre atmosferik basınç değerinin altında kaldıktan sonra (vakum etkisi), atmosferik basınç değerinde dengeye gelmektedir. Basınç şok dalgasının basınç-zaman profili Şekil 2'de gösterilmiştir.

Ölçülen en yüksek basınç P_{max} ile atmosferik basınç P_A arasındaki fark, pozitif aşırı basınç (overpressure) P_0 olarak ifade edilmiştir. Ampirik düzeltme faktörünün eklendiği, zamana bağlı basınç değişimini ifade eden denklem (1)'de verilmiştir [2].

$$P(t) = P_0 \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-\alpha \left(\frac{t}{t_d}\right)} \quad (1)$$



Şekil 2. Basınç şok dalgasının basınç-zaman profili

Burada α azalım parametresi, t zaman, P , t anındaki basınç değeri, P_0 maksimum aşırı basınç, t_d pozitif faz süresi, e doğal logaritma tabanıdır. Kinney [2], azalım parametresini farklı $\frac{P}{P_0}$ ve $\frac{t}{t_d}$ değerleri için çalışmasında sunmaktadır. Basınç impuls değeri ile azalım parametresi arasındaki bağıntı formülü (2)'de verilmektedir.

$$I = \int_0^{t_d} P(t) dt \left[\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} (1 - e^{-\alpha}) \right] \quad (2)$$

2.4. Malzeme Bilgisi

Analiz çalışmasında, enerji kaynağı modellenirken *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN malzeme kartı kullanılmıştır. Malzeme kartının yanında hal denklemi de kullanmak gerekmektedir. LS-DYNA kodu içerisinde enerji kaynağı malzemelerin modellenmesinde *EOS_JWL kartı kullanılmaktadır [1]. Jones-Wilkins-Lee (JWL) durum denklemi, enerji kaynağının ateşlenmesinden sonraki safhada, enerji kaynağının enerjisinin ortama aktarılması ve şok dalgalarının hareketini açıklayan ampirik bir denklemdir. Bu denkleme göre basınç, bağıl hacim ve birim hacim başına düşen enerjiye bağlı olarak değişmektedir (3)[1,9].

$$P = A \left[1 - \frac{w}{R_1 V} \right] e^{-R_1 V} + B \left[1 - \frac{w}{R_2 V} \right] e^{-R_2 V} + \frac{w E_0}{V} \quad (3)$$

Burada P basınç, V bağıl hacim, E_0 özgül iç enerjidir. R_1 , R_2 , A , B malzeme değişkenleridir. Bağıl hacim $V = \frac{v}{v_0}$ olarak ifade edilirken, v_0 tepkime öncesi enerji kaynağının ilk hacmidir. Enerji kaynağının malzeme bilgileri, Dobratz ve Crawford [4] tarafından çalışmalarında sunulmuştur. Bu değerler Tablo 1'de paylaşılmıştır. İnflak hızı D , P_{CJ} Chapman-Jouguet enerji kaynağı basıncı, ρ_0 ilk yoğunluk olarak verilmiştir. İnflak süreci, LS-DYNA kodu içerisinde bulunan programlanmış ateşleme yaklaşımı ile başlatılır. İnflak, programda uygulayıcı tarafından belirtilen noktada başlayarak, yüksek enerji kaynağı malzeme içerisinde sabit D hızı ile ilerler. İnflak tüm enerji kaynağı hacminde tamamlandıktan sonra hava hacmi ile etkileşim başlar ve oluşan basınç hava hacmine aktarılır.

Hava malzemesi *MAT_NULL malzeme kartı ile tanımlanmıştır. Hava malzeme modeli için gerekli olan durum denklemi lineer polinomal hal denklemidir ve (4) numaralı formül ile verilmiştir [3].

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (4)$$

Burada P basınç, index numarası 0-6 arasında değişen C değerleri malzeme katsayılarıdır. μ değişkeni, (5) numaralı denklemde verildiği şekli ile hacimsel oranı, E ise birim hacimdeki enerji değerini ifade etmektedir.

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (5)$$

Gazlar için ideal gaz denkleminde göre $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = \gamma - 1$ 'dir. γ özgül ısı oranını ifade etmektedir ve hava için 1.4 değerini almaktadır. Bu değerlere göre (4) numaralı denklem, aşağıdaki (6) numaralı denkleme dönüşmektedir.

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} \quad (6)$$

2.5. Bölüntünün Geometrik Şekilleri

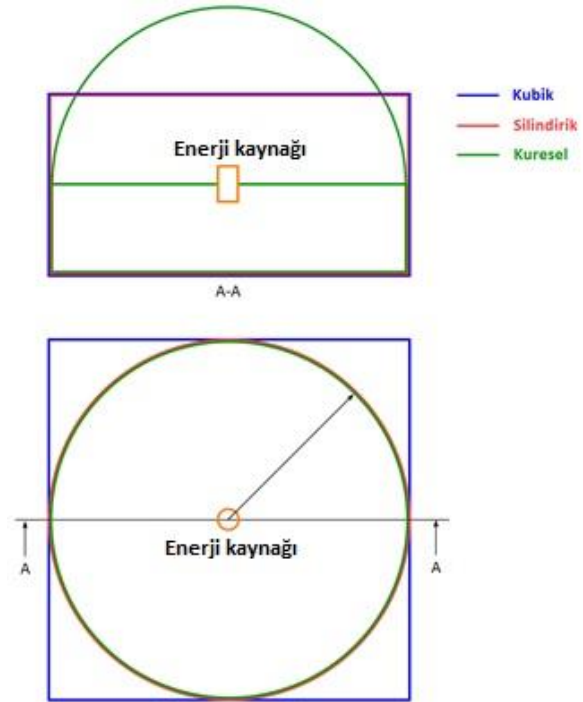
Çalışmada 3 farklı geometrik şekil ile analizler yapılmıştır. Kübik, silindirik ve küresel olarak seçilen bu geometrilere ait detaylar, Şekil 3'de paylaşılmıştır.

Enerji kaynağı tüm modellerde, deney çalışmasında olduğu gibi silindirik şekilde modellenmiştir, kütlesi ve boyutları

sabit tutulmuştur. Karşılaştırmaların yapılacağı ve sonuçların inceleneceği geometriler hava hacmine aittir.

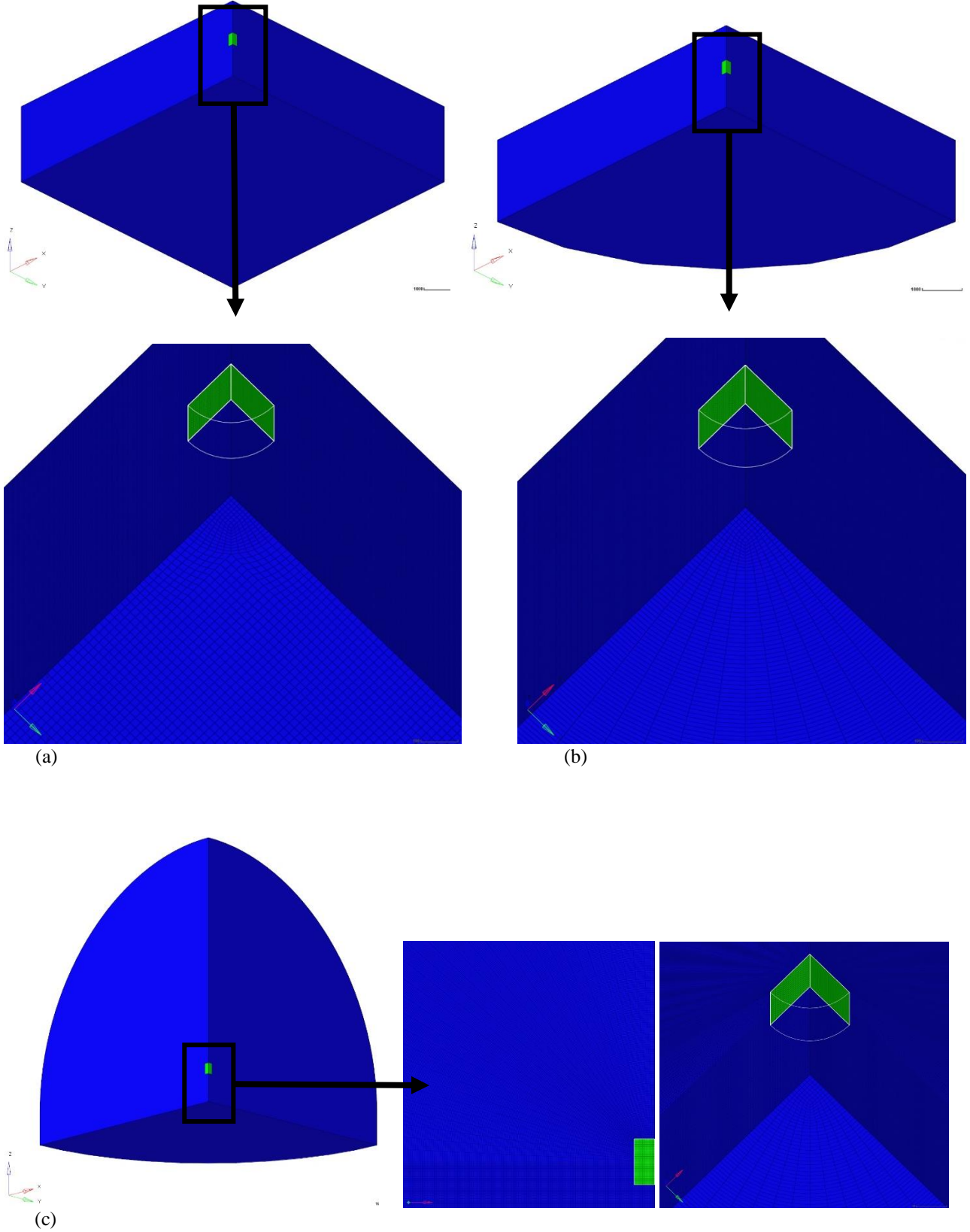
Tablo 1. Malzeme parametreleri

		[mm, kg, ms]						
Hava	*MAT_NULL							
	R_0	P_C						
	1.23E-9	0.0						
	*EOS_LINEAR_POLINOMIAL							
	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0	
	E_0							
2.58E-4								
Enerji Kaynağı	*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN							
	Rho	D	P_{CJ}					
	1.63E-6	6930.0	21.0					
	*EOS_JWL							
	A	B	R_1	R_2	$Omeg$	E_0	V_0	
	371.213	3.231	4.15	0.95	0.3	7.0	1.0	



Şekil 3. Kübik, silindirik ve küresel geometriler şematik gösterimleri

Tüm geometrilerde hava ve enerji kaynağına ait euler hacimler, 8 düğüm noktalı altıyüzlü (hexahedral) elemanlarla modellenmiştir. Merkez konumunda bulunan enerji kaynağı her zaman silindirik şekilde olduğundan; kübik ve küresel hava hacmi geometrisi elde edebilmek için enerji kaynağından hava hacmine geçişlerde, eleman diziliş doğrultularında düzenlemeler yapılmıştır. Silindirik hava hacmi geometrisi elde etmek için eleman diziliş doğrultularında herhangi bir değişiklik yapılmasına gerek duyulmamıştır. Her bir geometriye ait ağ yapısı, Şekil 4'de paylaşılmıştır.



Şekil 4. (a) kübik, (b) silindirik ve (c) küresel ağ yapıları çeyrek model gösterimleri

Geometriler iki ekseninde simetrik olduğundan çözümlerde simetri koşulu uygulanarak çeyrek modeller kullanılmıştır.

Hesaplamalı akışkanlar mekaniği eşitlikleri, Euler hacimlerde genellikle yüksek eleman çözünürlüğüne gereksinim duymaktadır. Bunun anlamı, eleman boyutunun küçülmesi ile birlikte, analiz modelindeki eleman sayısının

artmasıdır. Dolayısıyla, yüksek hassasiyete sahip analiz çözümleri için gerekli olan depolama alanları ve analiz hesaplama süreleri dramatik olarak artmaktadır. Bu yüzden analiz modeli oluşturulurken, ağ yapısı için optimum eleman boyutu belirlemek gerekmektedir. Bunu “bölüntü hassasiyet analizi” olarak isimlendirmek mümkündür. Bu çalışmada bölüntü hassasiyet analizi yapılmamış olup, bu konuda literatürden çalışmalar incelenerek uygun eleman boyutu belirlenmiştir [5].

Enerji kaynağı hacminde eleman kenar uzunlukları, birbirine eşit sayılabilecek uzunluklarda modellenenilirken, silindirik

ve küresel hava hacimlerinde elemanlar radyal yönlerde büyümektedir. Kübik hava hacminde ise elemanlar, kenar uzunluk oranı 1'e çok yakın olacak şekilde modellenenilmektedir.

Sonuçlara etkilerini görmek amacıyla, seçilen eleman boyutunu 4 kat büyütürük oluşturulan modellerle de analizler yapılmıştır. Sonraki bölümlerde, seçilen eleman boyutu d , 4 kat büyütülen eleman boyutu $4d$ olarak isimlendirilecektir.

Modellere ait eleman sayıları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Analiz modellerine ait eleman ve düğüm noktası sayıları

		ENERJİ KAYNAĞI		HAVA	
	Model	Eleman Sayısı	Düğüm Nok. Sayısı	Eleman Sayısı	Düğüm Nok. Sayısı
d mm Merkez Elemanlar	Kübik	4896	5810	35974656	36320317
	Silindirik	4896	5810	1910592	2081840
	Küresel	4896	5810	1208292	1317924
$4d$ mm Merkez Elemanlar	Kübik	168	270	3907974	4010109
	Silindirik	168	270	59934	71559
	Küresel	168	270	38157	45753

3. BULGULAR

3.1. Dinamik Yükleme Analizi Sonuçları ve Deneysel Çalışma ile Kıyaslanması

Kübik, silindirik ve küresel geometrilerin iki farklı eleman boyutu ile hazırlanan modelleri ile analizler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de bu geometrilere ait d mm elemanlarla hazırlanan çeyrek modellerde, şok basıncının zamana bağlı ilerleyişi görülmektedir. Kübik geometride, şok dalgası ilerleyişi sırasında yatayda enerji kaynağı hizasında daha hızlı yol aldığı, daha sonra ilerleyişin dengelendiği görülmektedir. Silindirik geometride, şok basıncı formu daha yumuşak geçişlere sahiptir. Küresel geometride ise, ağ yapısında eleman dizilişlerindeki doğrultu farkından dolayı şok basıncı formunun bozulduğu gözlemlenmektedir.

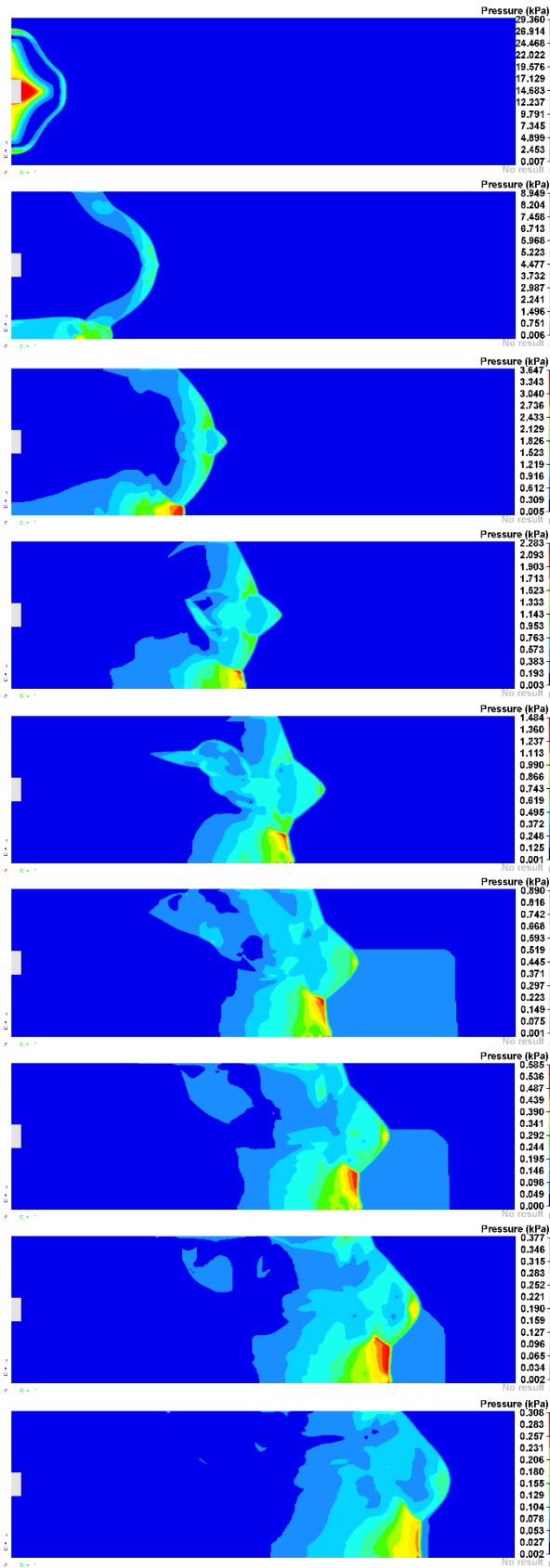
Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da $4d$ mm elemanlarla hazırlanan çeyrek modellerde, şok basıncının zamana bağlı ilerleyişi görülmektedir. Genel olarak tüm $4d$ mm elemanlarla hazırlanan geometriler d mm elemanlarla hazırlanan geometrilerle karşılaştırıldığında, ilerleyişlerin benzer olduğu görülmektedir. Ancak eleman yoğunluğu yüksek olan d mm elemanlarla hazırlanmış geometrilerde, şok basıncının havadaki dağılımı daha detaylı olarak görülebilmektedir. Şekil 11'de, dinamik yükleme testi sırasında ölçülen maksimum değer ile ölçüm alınan bu noktanın analiz modelinde karşılık gelen konumundan alınan basınç-zaman eğrileri, Tablo 3'de ise bu değerler ve test

ölçümüne göre sapma yüzdeleri paylaşılmıştır.

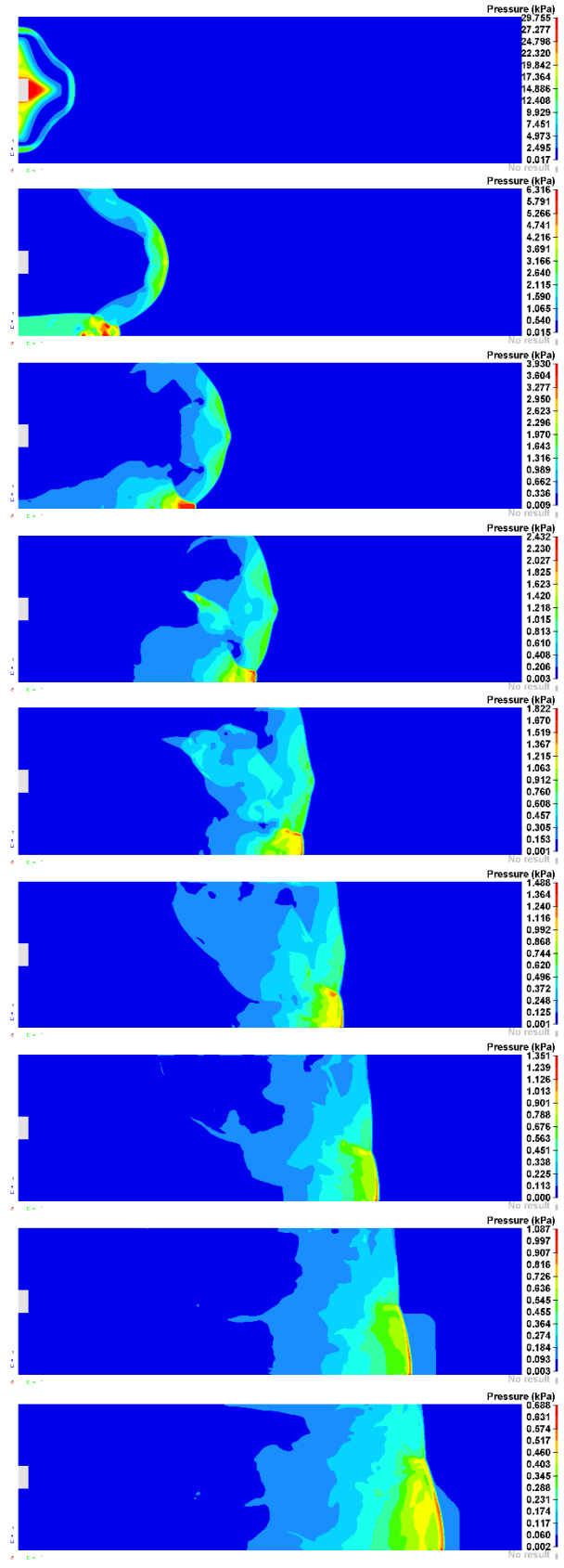
Eğriler incelendiğinde, basınç şok dalgasının ölçüm noktasına ulaşma sürelerinde farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir. Aynı eleman boyutuyla modellenen farklı geometrilerde, kübik geometriye sahip modelde basınç şok dalgası en hızlı şekilde ölçüm noktasına ulaşırken, küresel geometriye sahip modelde en geç ulaşmaktadır. Farklı eleman boyutuyla hazırlanan aynı geometrideki modellere bakıldığında ise, küçük eleman boyutuyla hazırlanan modellerde basınç şok dalgası ölçüm noktasına daha hızlı ulaşmaktadır.

Maksimum basınç değerleri incelendiğinde d mm boyutlu modellerin $4d$ eleman boyutlu modellere göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu durumun nedeni, boyutların küçülmesi ile birlikte hesaplama noktası sayısının artması, dolayısıyla daha hassas hesaplama ile birlikte, analiz sonuçlarının bir miktar değişmesidir.

Geometrik yapıların maksimum basınç değerlerine etkisi incelendiğinde ise test değerine en yakın sonucu d boyutlu da küresel geometri vermesine rağmen $4d$ boyutluda ise en kötü sonucu vermiştir. Bu hatanın küresel hava hacimlerinde elemanların radyal yönlerde büyümesi gösterilebilir. Kübik ve silindirik geometriler kıyaslandığında ise aynı eleman boyutunda silindirik geometri daha iyi sonuç vermiştir. Hava hacmi geometrisinin sonuçları etkilemesinin sebebi, hava hacminin geometrik şekline göre eleman akışının değişiyor oluşudur.

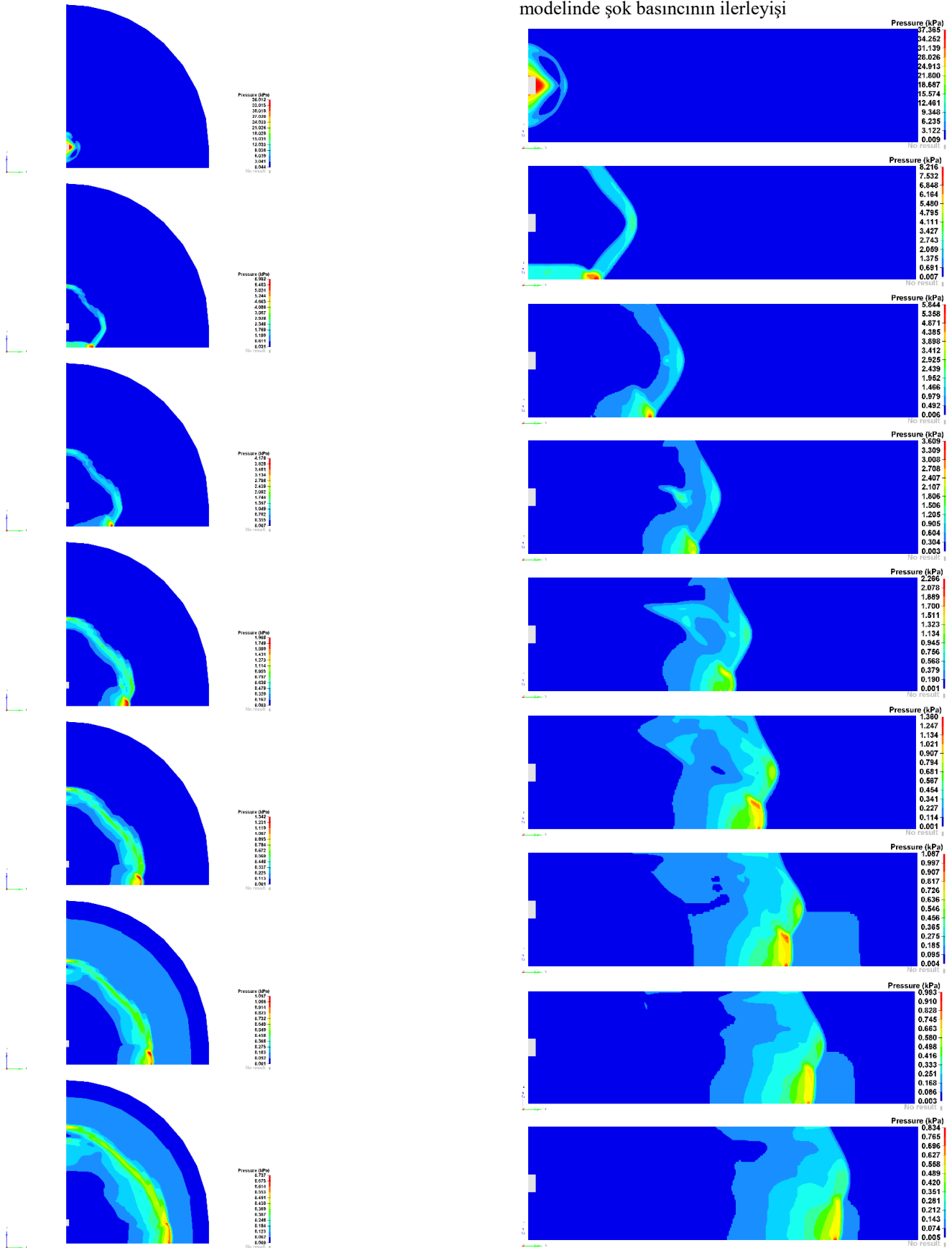


Şekil 5. d mm eleman boyutuna sahip kübik geometri modelinde şok basıncının ilerleyişi

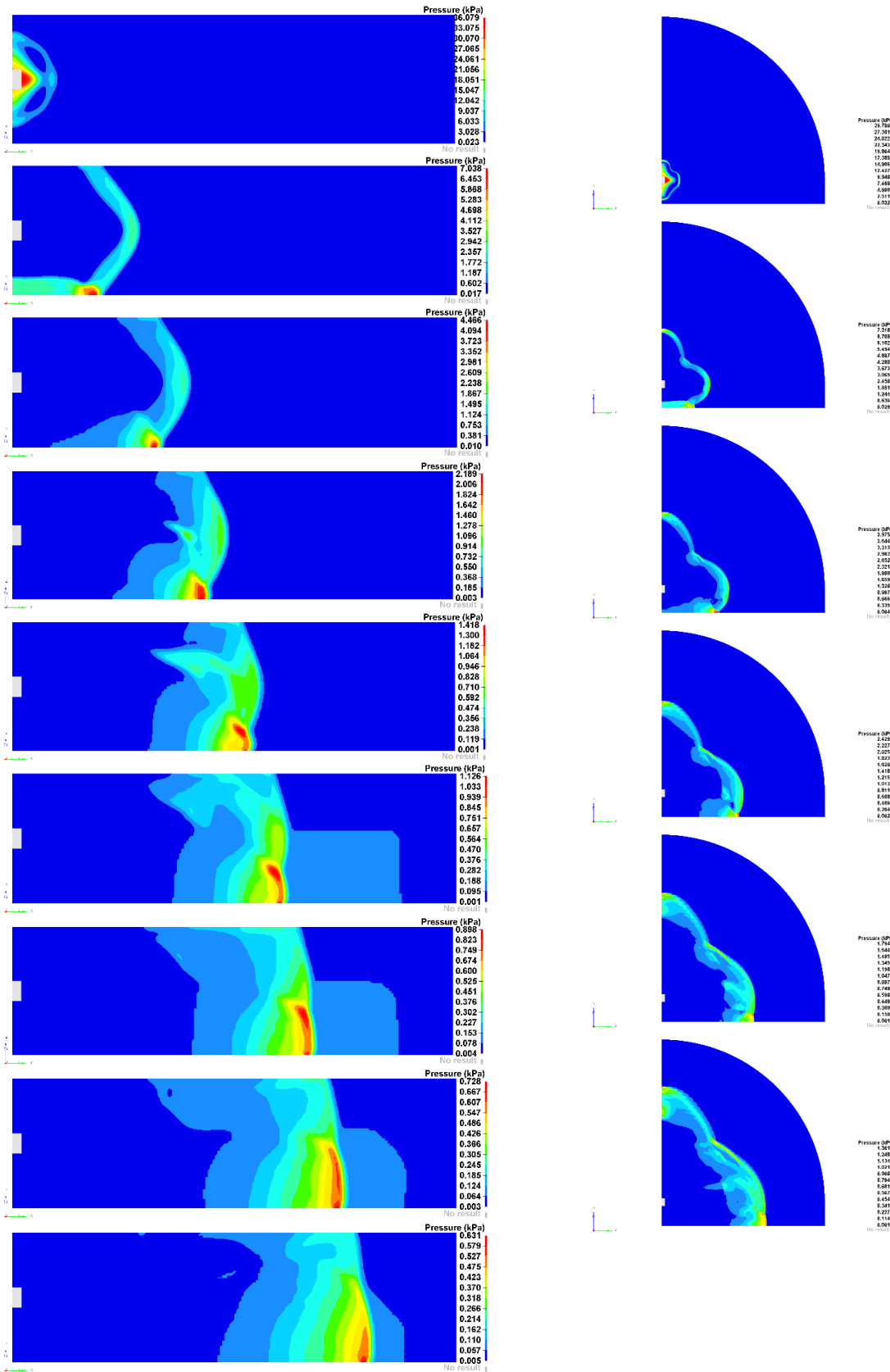


Şekil 6. d mm eleman boyutuna sahip silindirik geometri modelinde şok basıncının ilerleyişi

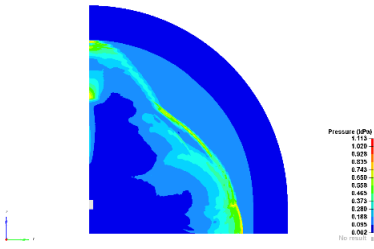
Şekil 7. *d* mm eleman boyutuna sahip küresel geometri modelinde şok basıncının ilerleyişi



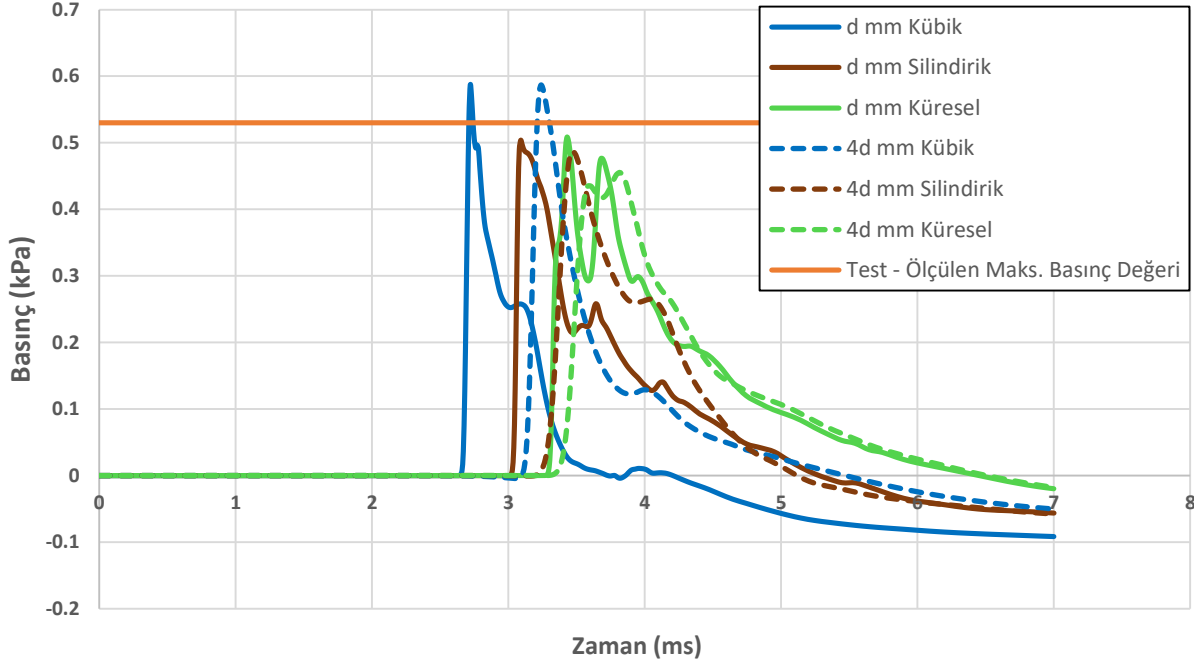
Şekil 8. 4d mm eleman boyutuna sahip kübik geometri modelinde şok basıncının ilerleyişi



Şekil 9. 4d mm eleman boyutuna sahip silindirik geometri modelinde şok basıncının ilerleyişi



Şekil 10. 4d mm eleman boyutuna sahip küresel geometri modelinde şok basıncının ilerleyişi



Şekil 11. Şok basıncının ölçüm noktasındaki zamana bağlı değişimi - Test maksimum ölçüm değeri

Tablo 3. Analizler ile hesaplanan eğri maksimumlarının test ölçümüne karşılık sapma yüzdeleri

	Maksimum Basınç [kPa]	% Sapma
d mm Kübik	0.586	10.57
d mm Silindirik	0.503	-5.09
d mm Küresel	0.508	-4.15
4d mm Kübik	0.587	10.75
4d mm Silindirik	0.487	-8.11
4d mm Küresel	0.455	-14.15
Test	0.53	0.00

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Bu çalışmada LS-DYNA sonlu elemanlar kodu ile gerçekleştirilen analizler ile kübik, silindirik ve küresel geometriye sahip hava hacminin basınç şok dalgasının ilerleyişine ve büyüklüğüne etkisi incelenmiştir. Hedef yapının ve enerji kaynağının yerden yüksekliklerinin belirli aralıklarda olduğu durumlarda bu çalışma referans alınabilir. Analiz sonuçları incelendiğinde, geometrik değişimlerin ve sonlu elemanların büyüklüğünün basınç şok dalgasının ilerleme hızını ve büyüklüğünü etkilediği belirlenmiştir.

Hava hacmi geometrisinin sonuçları etkilemesinin sebebi, hava hacminin geometrik şekline göre eleman akışının değişiyor oluşudur. Sonlu eleman boyutunun sonuçları etkilemesinin sebebi ise; boyutların küçülmesi ile birlikte hesaplama noktası sayısının artması, dolayısıyla daha hassas hesaplama ile birlikte, analiz sonuçlarının bir miktar değişmesidir. Yapılacak çalışmanın içeriğine göre, doğru sonuçlar elde edebilmek için hava hacminin geometrik şekline, sonlu elemanların büyüklüğüne, elemanların diziliş doğrultularına, eğer önemli ise basınç şok dalgasının ulaşma zamanına bakılması gerektiği anlaşılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, sayısal sonuçların doğrulanması için gerekli test çalışmaları ve test verilerinin elde edilmesinde sağladığı destekleri için BMC Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş., 'ye teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- [1] Hallquist, J., LS-DYNA keyword user's manual – Version 970, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, 2012.
- [2] G. F. Kinney and K. J. Graham, "Explosive Shocks in Air," 1985.
- [3] J.O. Hallquist, LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation, California, USA, 2006.
- [4] B. Dobratz, "Properties of chemical explosives and explosive simulants," 1972.
- [5] A. Erdik, S. A. Kilic, N. Kilic, and S. Bedir, "Erratum to: Numerical simulation of armored vehicles subjected to undercarriage landmine blasts," *Shock Waves*, vol. 26, no. 4, pp. 531–531, 2016.
- [6] Z. S. Tabatabaei, J. S. Volz, J. Baird, B. P. Gliha, and D. I. Keener, "Experimental and numerical analyses of long carbon fiber reinforced concrete panels exposed to blast loading," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 57, pp. 70–80, 2013.
- [7] W. Xiao, M. Andrae, L. Ruediger, and N. Gebbeken, "Numerical prediction of blast wall effectiveness for

structural protection against air blast," *Procedia Engineering*, vol. 199, pp. 2519–2524, 2017.

- [8] A. Alia and M. Souli, "High explosive simulation using multi-material formulations," *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, no. 10, pp. 1032–1042, 2006.
- [9] M. S. Chafi, G. Karami, and M. Ziejewski, "Numerical analysis of blast-induced wave propagation using FSI and ALE multi-material formulations," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, no. 10-11, pp. 1269–1275, 2009.
- [10] G. F. Kinney and K. J. Graham, *Explosive Shocks in Air*. Berlin: Springer Berlin, 2014.
- [11] P. S. Bulson, "A history of research and a review of recent developments," *Explosive Loading of Engineering Structures*, 1997.
- [12] T. Belytschko, D. Flanagan, and J. Kennedy, "Finite element methods with user-controlled meshes for fluid-structure interaction," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 33, no. 1-3, pp. 669–688, 1982.
- [13] W. Noh, "Cel: A Time-Dependent, Two-Space-Dimensional, Coupled Eulerian-Lagrange Code," 1963.
- [14] N. Aquelet, M. Souli, J. Gabrys, and L. Olovson, "A new ALE formulation for sloshing analysis," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 16, no. 4, pp. 423–440, 2003.
- [15] P. Woodward and P. Colella, "The numerical simulation of two-dimensional fluid flow with strong shocks," *Journal of Computational Physics*, vol. 54, no. 1, pp. 115–173, 1984.



Altın Geri Dönüşüm Prosesindeki Azot Oksit Emisyonunun Düşürülmesi

*¹Huzeyfe Özet, ²Banu Yeşim Büyükkakıncı

¹ İstanbul Aydın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, İstanbul/ Türkiye
huzeyfeozet@gmail.com

² İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye
yesimbuyukakinci@aydin.edu.tr

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 14.10.2019

Kabul Tarihi: 16.07.2020

Öz

Kuyumcu atölyelerinde, mücevherat yapımı süresince, çalışma ortamında toz olarak biriken altının geri dönüşümü ramatçılar tarafından sağlanmaktadır. Altın geri dönüşümünün kral suyuyla (hidroklorik asit ve nitrik asit karışımı) yapıldığı cila ramatı metodunda oluşan azot oksit(NO), hem çalışma ortamında bulunmakta hem de atmosfere salınmaktadır. Bu tesislerde oluşan NO gazının giderilmesi için kostikle yıkama yapılmaktadır. NO gazının suda çözünürlüğü çok düşük olduğu için, alkali maddelerle yapılan sulu-yıkamalı filtreleme sistemi tek başına yeterli olmamaktadır. Bu çalışmada yapılan cila ramatı prosesinde, kral suyuna eklenen katı sülfamik asit ile NO oluşumu azaltılarak, ortama çevre ve insan sağlığı için zararsız olan nitroz oksit gazı(N₂O) verilmiştir. Yapılan ölçümlerde NO parametresinin sıfır olduğu ve ortamda proses boyunca hiç bulunmadığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Altın geri dönüşümü, Cila ramatı, İş sağlığı ve güvenliği, Sülfamik asit

Reduction of Nitric Oxide Emission in Gold Recycling Process

*¹Huzeyfe Özet, ²Banu Yeşim Büyükkakıncı

¹ İstanbul Aydın University, Institute of Science, Department of Occupational Health and Safety, İstanbul, Turkey
huzeyfeozet@gmail.com

² İstanbul Aydın University, Faculty of Engineering, Department of Textile Engineering, İstanbul/Türkiye
yesimbuyukakinci@aydin.edu.tr

Abstract

In jewelry workshops, during the production, the gold is accumulated as dust in the working environment. The recovery of these golden micro particles is provided by gold recycle workers. Nitric oxide is formed in a method called "polishing waste" which is the leaching process of gold within aqua regia (mixture of hydrochloric acid and nitric acid) for gold recovery. Nitric oxide is not only found in the working environment but also released into the atmosphere. Wet scrubbing with sodium hydroxide is used in order to eliminate NO gas, formed in the process. Since the water solubility of NO gas is very low, the wet scrubbing filtration system made with alkali materials is not sufficient alone. In this study, nitrous oxide gas (N₂O), which is harmless to environment and human health, is given off to the atmosphere by reducing NO formation with addition of solid sulfamic acid to aqua regia. It was observed that NO parameter was zero and nitric oxide was not present at all during the process.

Keywords: Gold recovery, Polishing waste, Occupational health and safety, Sulfamic acid

1. GİRİŞ

İlkçağlardan günümüze popülerliğini kaybetmeyen altına olan talep, gün geçtikçe artmaktadır. Türkiye altın rezervi bakımından Dünyada ilk sıralarda yer almasa da, mücevherat imalatında, İtalya'dan sonra hurda kullanımıyla birlikte Avrupa'da ikinci, Çin, Hindistan ve İtalya'dan sonra dünyada dördüncü sırada yer almaktadır. Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, 2018 Mücevherat Sektör Raporu'na göre yılda 250-300 ton altın işlenmektedir. Üretim sırasında ciddi miktarlarda altın mikronize toz halinde tezgahlarda, zeminde, kıyafetlerde, el yıkama suyunda birirmektedir. Atölyede belirli aralıklarda toplanan ve ramat adı verilen bu altın tozu, kirlerden arındırılarak geri dönüşümü yapılmak üzere ramatçılara gönderilmektedir. Ramatçılar da çoğunlukla cila ramatı metoduyla kral suyuyla (hidroklorik asit ve nitrik asit karışımı) işledikleri altın ramatını, işlenebilir altın olarak sektöre geri kazandırmaktadırlar. 2006 yılına kadar Eminönü Kapalıçarşısı'nda ilkel yollarla çalışan ramatçılar, belediyece alınan kararlar İkitelli Organize Sanayii'ne taşınmıştır. İş sağlığı ve güvenliği adına daha donanımlı olan bu tesisler Çevre ve Şehircilik Bakanlığınca kontrol edilmekte ve akredite laboratuvarlar tarafından düzenli gaz-buhar emisyon ölçümleri yapılmaktadır.

Dünya Sağlık Örgütü'ne göre dış hava kalitesinin düşük olması sigara içmekle hemen hemen aynı sağlık risklerini oluşturmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü, 2019 yılı için sağlık açısından en önemli 10 tehdit arasında ilk sıraya hava kirliliğiyle birlikte iklim değişikliği sonucu ortaya çıkan sağlık sorunlarını yerleştirmiştir [1]. Ayrıca Türkiye Toraks Derneği 2016 yılında "Nefes Alamıyoruz" adlı sempozyumda, Türkiye'de hava kirliliği nedeniyle her yıl 32 bin kişinin öldüğünü ve ülkemizin 81 ilinin 80'inin havasının Dünya Sağlık Örgütü kriterlerine göre kirli olduğunu ve her yüz bin ölümün, 44'ünün hava kirliliği nedeniyle olduğunu, açıklamıştır [2].

Ülkemizde, 2008 yılında AB uyum sürecinde hazırlanan hava kalitesi yönetimine ilişkin usul ve esaslar, Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği (HKDYY) ile belirlenmiştir. Ancak ülkemizde kabul edilen ulusal sınır değerler, hem Avrupa Birliği sınır değerlerine, hem de Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) hava kalitesi rehberlerinde yer alan sınır değerlere göre çok yüksektir. Bu yönetmelikle ülkemizin 2019 yılına kadar kademeli olarak hava kirlenmelerinin parametrelerini azaltması ve en geç 2024'de de Avrupa Birliği limit değerlerine tamamen uyum sağlanması hedeflenmiştir.

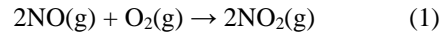
TMMOB Çevre Mühendisleri Odası 2018 Hava Kirliliği Raporuna göre, endüstriyel tesislerin yoğun olduğu Başakşehir ilçesinin yıllık ortalama NO_x(toplam NO ve NO₂) sınır değeri 30 µg/m³ olması gerekirken, 56 µg/m³ olduğu görülmüştür [3]. Bu bölgede yer alan Çevre Sanayii Sitesi'nde tehlikeli kimyasallarla çalışan ramat tesisleri birlikte bulunmaktadır. Asit yağmurları ve solunum yolu hastalıkları gibi zararlı etkilerden çok daha fazlasına neden olan azot oksit(NO) ve azot dioksit (NO₂)gazlarının

emisyon değerleri, bu sitede yer alan, pilot bir ramat tesisi seçilerek incelenmiştir. Akredite laboratuvar tarafından yapılan ölçüm raporunda NO_x parametresinin 23,8 µg/m³ olduğu ve Bakanlık tarafından belirlenen sınır değerinin(30 µg/m³) aşılmadığı görülmüştür. Ancak 2024 yılına kadar her yıl kademeli olarak düşürülecek NO_x sınır değerlerinden dolayı bu parametrelerle ilgili iyileştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, ramat tesislerinin aynı sanayii sitesinde yerleşik olduğu göz önünde bulundurulduğunda, genel ölçüm sonucuna olan etkisi azımsanamaz. İş sağlığı ve güvenliği açısından yapılan değerlendirmelerle, seçilen tesiste oluşan NO_x değerinin, çalışma ortamında ve atmosfere salınımının daha düşük seviyeye indirilmesi amacıyla laboratuvar ortamında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmayla oluşturulan kapalı sistem sayesinde çalışanlar, asit kabininden yayılan NO_x gazlarına maruz kalmadıkları gibi, asit buharlarını solumamakta ve sıçrayan asit kaynaklı cilt tahrişinden de korunmaktadırlar.

2. AZOT OKSİTLER

2.1. Azot Oksitlerin Özellikleri

Azotun oksijenli bileşikleri, diazot oksit (N₂O), azot monoksit(NO), azot dioksit (NO₂), diazo trioksit (N₂O₃), diazot tetroksit (N₂O₄), diazot pentoksittir (N₂O₅). NO_x ile gösterilen, NO (azot monoksit) ve NO₂ (azot dioksit) hava kirliliği bakımından önemli olan azot oksitlerdir. 1770 de Joseph Priestley tarafından keşfedilen bu gazlardan NO, keskin kokulu, renksiz, suda çözünürlüğü çok düşük, erime noktası 163.6 °C ve kaynama noktası 151.8 °C dir. NO elektron yapısından dolayı kolaylıkla hava olan ortamda oksijenle reaksiyona girerek NO₂ yi oluşturur(Reaksiyon 1) [4].



Azot dioksit ise kırmızıya yakın kahverengi renkli, keskin kokulu ve zehirli bir gazdır. Su ile reaksiyona girerek nitrik asit ve nitroz aside dönüşür (Reaksiyon 2). Koku alma alt sınır değeri 0.5 ppm'dir.

2.2. Çalışma Yerlerinde Azot Oksitler ve Etkileri

Azot oksitler endüstriyel tesislerde yoğun bir şekilde oluşmaktadır. Özellikle sülfürik asit elde edilmesinde, nitrik asit ve nitratların yapımında, boya ve patlayıcı maddelerin üretiminde, nitrosellüloz boya, yapay kumaşların formülasyonunda, gübre ve siyanamid yapımında görülmektedir. Ülkemizdeki çoğu endüstri kuruluşunda azot oksitler için yeterli arıtma sistemi mevcut değildir. Yeni yönetmeliklerin getirdiği yaptırımlar sonucu, yeni yapılan tesisler, limit değerlerinin altında emisyon salınımı sağlayamayan tesisler, arıtma/yıkama tesisleri kurmaktadırlar. Motorlu taşıtlardan çıkan egzoz gazlarıyla da çevreye NO_x gazları salınmaktadır. Egzoz gazlarında

azot monoksit (NO) miktarı, azot dioksit (NO₂) göre daha fazladır [5].

İşyeri havasında NO₂'nin eşik sınır değeri 5 ppm 'dir. Normal temiz hava saatlik NO₂ eşik sınır değeri ise 0.25 ppm dir. Azot dioksit etkisini çok çabuk gösteren bir gazdır. 250-500 ppm NO₂'e maruz kalan bir kimse koku ve görünüşünün farkına varmaksızın çok kısa süre içerisinde yaşamını kaybedebilir. Daha düşük dozları ise etki süresine göre ölümcül olabilir. Kronik zehirlenmede baş ağrısı, halsizlik, kabızlık, ağız ve yutak mukozasında ülserasyon görülür. Çalışanların işyerinde, 5 ppm NO₂ in 4 saatlik maruziyeti sonucu, solunum sıklığı artarak tahribat etkisi görülmeye başlanır [5].

Azot gazları (özellikle azot monoksit), methemoglobinemiye (hemoglobinin içeriğindeki iki değerli demirin, üç değerli ferri haline dönüşmesi ve dokulara oksijen taşınamaması durumu) neden olabilir. NO₂ miktarı yüksek şehir havasını soluyan çocuklarda akut bronşite ve yüksek methemoglobine rastlanmıştır. Methemoglobinemi kandaki toplam hemoglobinin, %10 unu geçmesi siyanozise (morarma), %30 unu geçmesi halsizlik, bulantı, akciğer ödeme, %70 i geçmesi ise ölümlü vakalara neden olmaktadır [5,6].

2.3. Azot Oksitlerin Ekosisteme Etkileri

Atmosfer bünyesinde %78 oranında azot bulunmaktadır. Azotun yanması sonucunda ortaya çıkan azot oksitleri(NO_x) hava kirliliğine yol açan önemli emisyonlardır. Birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de belirlenen yönetmelikle bu kirleticilerin ölçülmesi, değerlendirilmesi ve önlemler alınması zorunludur. Dünya Sağlık Örgütü rehberinde yayınlanan ve Avrupa Birliği ülkelerince belirlenen NO₂ standartlarıyla, ulusal sınır değerlerimiz kıyaslandığı durumda, parametrelerde farklılık görülmektedir (Tablo 1). Ancak, ülkemiz limit değerleri kademeli olarak her yıl düşürülerek en geç 2024'e kadar AB ile uyumlu olacaktır [3].

Tablo 1: Ülkemizde 2018 yılında uygulanan sınır değerler ile AB Ülkelerinde uygulanan ve Dünya Sağlık Örgütü tarafından belirlenen sınır değerler [3,7]

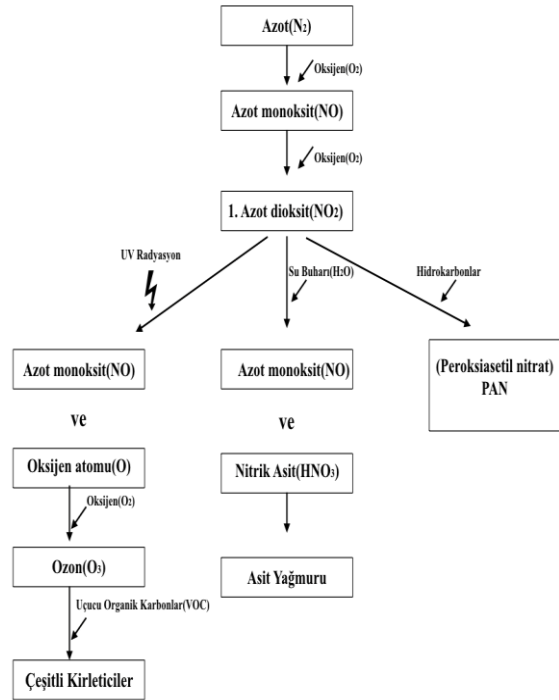
Ölçüm Periyodu	Sınır Değerler(NO ₂)		
	Türkiye'de Uygulanan (2018)	AB Ülkelerinde Uygulanan	Dünya Sağlık Örgütü
Saatlik	260 µg/m ³	200 µg/m ³	200 µg/m ³
Yıllık	44 µg/m ³	40 µg/m ³	40 µg/m ³

Atmosfere salınan NO_x değerinin çoğunlukla öncelikle azot monoksit(NO) fazında olması, endüstriyel tesislerin yoğun bulunduğu şehirlerde gerçekleşir [8]. Azot oksitler,

atmosferin %75'inin toplandığı, yere temas eden en alt troposfer katmanında, hava kalitesini ciddi oranda düşüren fotokimyasal sis oluşuma neden olmaktadır. Atmosferin üst katmanlarında doğal olarak bulunan ozon(O₃), güneşten gelen mor ötesi ışınları azaltan önemli bir gazdır. Ancak, troposfer katmanında güneş ışığında, NO₂ nin fotoliziyle zararlı hava kirleticisi olarak oluşmaktadır. Fotokimyasal dengeyle oluşan ozonun, NO ile reaksiyonuyla tekrar NO₂ oluşmaktadır [9,10].

Bu reaksiyonlar sırasında, ortamda bulunan hidrokarbon (HC), uçucu organik bileşikler (VOC) ve radikaller (RO₂) ozonun tüketimi tam gerçekleşmeden, NO₂ oluşumunu sağlarlar. Fotokimyasal dengenin bozulmasıyla ozon seviyesinde artış olur. Biriken fazla ozonun, hava hareketleriyle dağılması sonucunda, fotokimyasal sis oluşmaktadır. Bu olayla yeryüzünde dolanan fazla ozon, ekosisteme ciddi zarar vererek insan, hayvan ve bitki sağlığına, malzemenin güvenliğine ve ömrüne olumsuz etkiler yapar. Gün ışığında tam yanmayan hidrokarbonlar ozon varlığında, azot oksitlerle PAN (peroksiasetil nitrat) oluşumunu sağlayarak, fotokimyasal siste yer alır [9].

NO₂ havada bulunan nem ve su buharıyla birleşerek, bir dizi reaksiyon sonucu nitrik asit(HNO₃) oluşumunu sağlar. Bu asidik yapı çığ, sis, kar ve yağmurun pH seviyesini düşürerek asidifikasyonuna neden olur. Yeryüzüne inen bu hidrometeor asit yağışları, tarım alanlarını, ormanları, suda yaşayan canlıları, kısaca tüm çevreyi ve canlıları olumsuz etkilemektedirler [11]. Troposferde gerçekleşen bu fotokimyasal sis olayına Şekil 1' de yer verilmiştir.



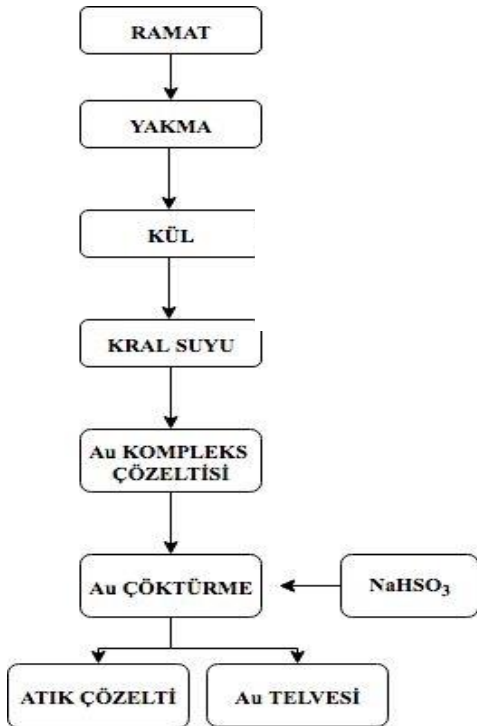
Şekil 1: Fotokimyasal sis oluşumu [11]

3. CİLA RAMATI PROSESİ

Kuyumcu atölyelerinde, mücevherat üretimi sırasında yapılan kesme, şekillendirme, eğeleme, cilalama gibi işlemlerde kopan mikronize altın parçacıkları tezgahlar, iş elbiseleri, duvarlar, yerdeki ızgara araları, havalandırma filtresi gibi yerlerde birikirler. Düzenli aralıklarla toplanıp vakumlu torbalara koyulan, bu altın içerikli tozlara altın ramatı denilmektedir. Bu tozlardan altın geri kazanımını ramatçılar sağlarlar. Ramatçılık sektöründe farklı yöntemler kullanılsa da çoğunlukla, kral suyunun kullanıldığı cila ramatı metodu uygulanmaktadır. Cila ramatının genel işleyişi Şekil 2’de belirtilmiştir.

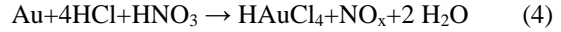
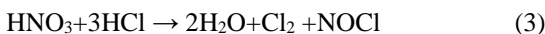
Atölyelerde biriktirilen altın içerikli toz ramatlar, ramatçılara torbalarla gönderilir. Öncelikle sanayii tipi fırınlarda yakılarak organik kirlere arındırılan altın ramatı, asit kabininde düzenli karıştırma ve ısıtma sağlanarak, kral suyuyla liç edilir.

Kral suyu hurdanın çözümlendirilmesi sonucunda altın, platin, paladyum, bakır, kurşun ve kalay gibi metaller çözünerek sıvı faza geçer. Gümüş, klorür, rutenyum, iridyum, rodyum ve osmiyum ise çöker. Saf altının kral suyu çözünmesi sonucu oluşan çözeltinin rengi sarıdır, yapıdaki bakır miktarına bağlı olarak ise sarımsı yeşile dönebilir.

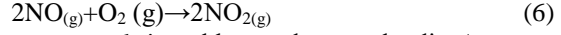
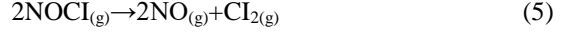


Şekil 2: Cila ramatı işleyişi akım şeması [12]

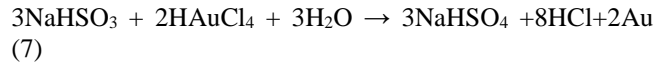
Kral suyu oluşumu ve altın ramatıyla gerçekleşen reaksiyon (Reaksiyon 3,4) aşağıda belirtilmiştir [12].



Kral suyunun oluşumu reaksiyonunda (Reaksiyon 3) nitrozil klorür ve klorür gazı oluşmuştur. Nitrozil klorürde kendi içinde [13];



azot monoksit ve klorüre dönüşmektedir. Azot monoksit ise atmosferdeki oksijenle reaksiyona girerek azot dioksit gazına dönüşmektedir (Reaksiyon 6). Oluşan çevre ve insan sağlığı için zararlı olan azot oksit (NO) ve azot dioksit (NO₂) gazları, kostik (NaOH) içerikli sulu-filtreleme sistemiyle azaltıldıktan sonra atmosfere salınmaktadır. Altın ramatının kral suyuyla reaksiyonu sonucu, sıvı fazda bulunan altın ve diğer değerli metaller ile çamur halde çökenlerin tamamen ayrıştırılması için santrifüj makinesi kullanılmaktadır. Kükürt dioksit (SO₂), sodyum bisülfid (NaHSO₃), demir (II) sülfat (FeSO₄) gibi kimyasallarla kral suyu bulunan altın çöktürülür. Redüksiyon için en yaygın kullanılan sodyum bisülfittir (Reaksiyon 7). Cila ramatı prosesi sonunda %97- %99 oranında altın geri kazanımı sağlanır [13].



4. MATARYEL VE METOT

İstanbul’un Başakşehir ilçesinde, İkitelli Organize Çevre Sanayii’nde yer alan pilot bir ramat tesisi seçilerek, kral suyu metodunun iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirmeleri yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda yapılan işlemlerin optimizasyonu sağlanmıştır. Pilot tesis cila ramatı akım şemasında yer alan basamaklara göre işleyişi göstermektedir.

2.basamakta yer alan kral suyuyla altın ramatının reaksiyonun gerçekleştiği işlemde, asit kabininde bulunan kazanda karıştırma, el ile aralıklı olarak yaklaşık 1.5 saat boyunca yapılırken, çalışanlar tehlikeli asit buharlarını, proses gazlarını (NO ve NO₂) solumakta ve sıçrayan kuvvetli asitlere maruz kalmaktadırlar (Şekil 3).



Şekil 3: Kral suyuyla altın ramatı reaksiyonunun gerçekleştiği kazan

Pilot ramat tesisinde gaz yıkama filtreleme sistemi bulunmaktadır. Proses sonucu çıkan gazlar, filtreleme sisteminde bulunan sodyum hidroksitle (NaOH) yıkanarak NO_x emisyon parametresi düşürülmektedir. Emisyon değerleri akredite laboratuvar tarafından düzenli ölçümler sağlanarak, raporlanmaktadır. Bu raporlara göre, NO_x emisyon değerleri 23.8 µg/m³ olduğu ve bakanlık tarafından belirtilen sınır değer (30 µg/m³) altında olduğu görülmüştür.

Cila ramatı metodunda kullanılan kral suyu prosesini, iş sağlığı ve güvenliği bakımından iyileştirmeler yapmak ve çevreye salınan NO_x değerini daha da düşürmek için laboratuvar ortamında deneysel çalışmalar yapılmıştır.

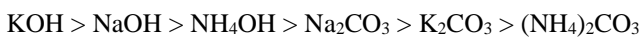
Bu çalışmada kullanılan ekipmanlar;

- Manyetik karıştırıcı balon ısıtıcı,
- 1000 ml. cam reaksiyon balonu ve 4 boyunlu cam kapağı,
- Kurutma borusu,
- Kapiler, civalı termometre ve adaptörü,
- Gaz yıkama şişesi,
- Penta NO ölçüm cihazı
- Laboratuvar tipi vakum pompası,
- Bağlantılar için silikon hortumlar

Deneysel çalışmalarda da kral suyu hazırlamak için hidroklorik asit (%35) ve nitrik asit (%55), kral suyunda çözmek için 2 gr altın (24 ayar), reaksiyon sonu çıkan azot oksit gazının eliminasyonu için sülfamik asit (H₃NSO₃), filtreleme için sodyum hidroksit(NaOH), çözünen altının geri kazanımı için sodyum meta bisülfat ve altın testi için kalay klorür (SnCl₂) ve İndüktif eşleşmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS) kullanılmıştır.

Öncelikle ortamda oluşabilecek maksimum NO_x değerinin ölçümü ve azot monoksit gaz-ölçer cihazın değerlendirilmesi için kontrol deneyi gerçekleştirilmiştir. 90 °C sıcaklıkta, 1:3.5 oranında HNO₃ ve HCl cam reaktörde karıştırılmasıyla oluşan kral suyunda, gaz düzenli olarak izlendiğinde, değer sürekli artarak 250ppm'e kadar yükselmiştir.

Kontrol deneylerinden sonra, Şekil 4' de gösterilen deneysel düzenek kapalı çeker ocak içerisinde hazırlanmıştır. Gaz yıkama şişesine, filtreleme için 1molar NaOH çözeltisi hazırlanarak konulmuştur. Azot oksitlerin azaltılması için kullanılan alkali çözeltileri etkenliklerine göre aşağıda belirtilmiştir [14]. Ramat tesislerinde sodyum hidroksit kullanıldığı için (daha ekonomik olmasından dolayı), bu çalışmada da sodyum hidroksit çözeltisi tercih edilmiştir.



Cam reaksiyon balona öncelikle 11M HCl asit çözeltisi ile 2 gram altın (24K) koyulup, manyetik karıştırıcı ve ısıtıcı (90 °C) açık hale getirilerek reaksiyonun hızlanması sağlanmıştır. 11M HNO₃ asit çözeltisi yavaşça eklenerek

kral suyu oluşumu başlatılmıştır. Kısa süre sonra altın, kral suyu içerisinde çözülmüş ve kırmızı-kahverengi renkli NO ve NO₂ gaz oluşumu başladığında, sülfamik asit(H₃NSO₃) katı olarak eklenmiştir (Reaksiyon 9). Sülfamik asit eklenmesiyle kral suyunun oluşumunda ortaya çıkan nitrozil klorür miktarı(Reaksiyon 3) azaltılmıştır. Buna bağlı olarak oluşacak NO miktarı da düşürülmüştür (Reaksiyon 8). Ayrıca, bu reaksiyonda oluşan sülfirik asit (H₂SO₄) ramatta kurşun bulunması durumunda, kurşunu çökerterek altından ayırtmaktadır (Reaksiyon 9). Bu adımda, eklenecek sülfamik asit miktarını belirlemek çok önemlidir. Fazla eklendiğinde altının bir kısmı çökeltiye geçerken, az eklenmesi NO_x miktarının yeterince azalmamasına neden olmaktadır. Sülfamik asit, cam balondaki kral suyuna değişiklik gözlemlenmeye kadar azar azar ilave edilmiştir.



Tablo 2'de NO_x için indirgeyici maddeler, yukarıdan aşağıya pahalılık ve etkenlik açısından sıralanmıştır [15]. Hidrazin en etken maddeyken en pahalı kimyasaldır. Ramatçılık sektörü finansal açıdan dar gelirli grubuna girdiğinden ve sülfamik asidin kolay bulunabilirliğinden dolayı sülfamik asit, indirgen madde olarak seçilmiştir.

Tablo 2: NO_x eliminasyonu sağlayan yaygın amin grupları (-NH₂) [15]

Hidrazin	N ₂ H ₂
Hidroksil amin	HONH ₂
Hidroksil amin Sülfat	(HONH ₂) ₂ · H ₂ SO ₄
Sülfamik Asit	H ₃ NSO ₃
Üre	H ₂ N · CO ₂ · NH ₂

Gaz çıkışı bitinceye yani reaksiyon tamamlanmaya kadar azot oksit ölçer cihaz aktif halde tutulmuş ve izlenmiştir.

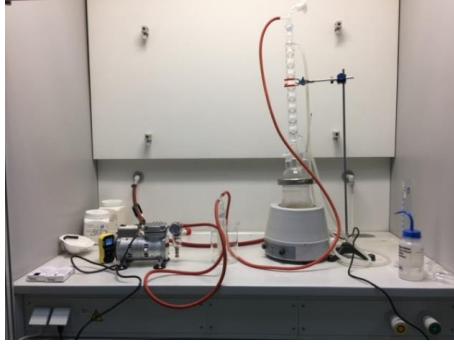
Reaksiyon cam balonunda oluşan sarımsı çözeltili soğuduktan sonra, kral suyunda çözünmeyen maddelerden filtre kağıdıyla ayrıştırılmıştır. İçerisinde altın bulunan sarı çözeltideki altını çökertmek için, hazırlanan sodyum metabisülfat çözeltisi altın çözeltisine eklenmiştir. Tam çökeltilinin oluşmasından sonra, SnCl₂ ile çözeltide altın varlığı ön-kontrolü yapılmıştır. Yapılan çalışmada, çözeltideki altının tamamının çöktüğü belirlenmiştir. Daha sonra ileri analiz yapılarak çözeltideki olası altın varlığı tespit edilmiştir. BOREN Ar-Ge Merkezi Laboratuvarında, İndüktif eşleşmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS) ile yapılan analiz sonucunda çözeltide kalan altın miktarının 0.031ppm olduğu ve altının tamamının çöktüğü belirlenmiştir (Tablo 3).

Tablo 3: ICP-MS Analizi sonucu: Çözeltildeki altın miktarı

Analiz/Test Kodu: KA-02

Numune Kayıt No	Numune İşareti	Au ppb
20-H-00067	Numune 1 (Au)	0.031

Daha sonra çökelti süzülüp, tamamıyla kuruduktan sonra tartılarak yüzde verimlilik hesaplanmıştır.

**Şekil 4:** Cila ramatının laboratuvar ortamında dizaynı

5. BULGULAR

DeneySEL çalışmanın, kral suyuyla altın çözünmesi adımı, azot oksit ölçme cihazıyla düzenli olarak yapılan ölçüm, sıfır parametresini deney sonuna kadar, değişim olmadan göstermiştir. Proses ortamda azot oksit gazı oluşumu olmadan tamamlanmıştır.

Deney sonunda 1.983 gram saf altın elde edilmiştir.

Proses verimi;

2 gram 24 k altın kitlesinin içerisinde 1.99 gr saf altın bulunduğundan

$1.983/1.99 \times 100 = \% 99.6$ olarak hesaplanmıştır.

1.99 gram saf altını çözüldürmek için, 1.95 ml HNO₃, 7 ml HCl, 3 gram katı sülfamik asit ve redüksiyon için 2 gram sodyum bisülfid (NaHSO₃) yeterli olmuştur.

Kral suyuna eklenen katı sülfamik asit, oluşan NO_x miktarını düşürmektedir. Reaksiyon sonucunda ortaya çıkan diazot oksit (N₂O) ise çevre ve insan sağlığı için zararsızdır. Ortamda çalışır halde bulunan NO ölçerle yapılan takipte, solunan havada azot oksitin hiç oluşmadığı tespit edilmiştir.

2 gram saf altın ile yapılan bu çalışmadan sonra altın miktarı azaltılarak deneyler tekrarlanmıştır. 1.5g ve 1g saf altının çözünmesi için kullanılan HCl ve HNO₃ oranları benzerlik göstermiştir (Tablo 4).

Tablo 4: Saf altının çözünmesi için gerekli kral suyu miktarı

Saf altın (24K)	HCl (ml)	HNO ₃ (ml)
1	3.5	0.95
1.5	5.2	1.40
2	7.0	1.90

Daha sonra, altının çözünmesinde sıcaklığın etkisi araştırılmış ve 1.5 g saf altına 3 farklı sıcaklıkta (30°C - 60°C - 90°C) kral suyu uygulanmıştır. Yapılan çalışmada, altının 90 °C de 1.5 saatte (90dk) tamamen çözüldüğü tespit edilmiştir. Bu çözünme süresi 60°C de 105, 30°C de ise 130 dakikaya çıkmıştır. Deney sıcaklığının yükseltilmesiyle altının çözünme hızının arttığı, gaz çıkışının da hızlandığı tespit edilmiştir.

6. SONUÇ

Cila ramatı prosesinde, kullanılan kral suyundan dolayı çalışma ortamında oluşan ve atmosfere salınan NO_x gazları insan sağlığını ve çevreyi tehdit etmektedir. Ramat evlerinde filtrasyon için kullanılan sodyum hidroksit içerikli sulu yıkama filtre sistemi azot oksit emisyonunu düşürmek için yeterli olamamaktadır. Bunun nedeni azot oksidin (NO) suda çözünürlüğünün çok düşük olmasıdır. Ayrıca çalışanlar, proses boyunca kuvvetli asidik yapıları kral suyunu el ile karıştırmakta ve ciddi tehlikelerle karşılaşmaktadırlar. İş sağlığı ve güvenliği adına yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda;

- Fazla kullanılan kimyasallar çevre ve insan sağlığını olumsuz etkilediğinden, HNO₃ kullanımının asgari seviyede tutulması gerekmektedir. Ramat tesisinde 1 gram altını (24k) çözüldürmek için ortalama 2 ml nitrik asit kullanılırken, bu çalışmada uygulanan proses için 0.95 ml HNO₃ yeterli olmuştur.
- Deney sıcaklığının yükseltilmesiyle altının çözünme hızının arttığı, gaz çıkışının da hızlandığı tespit edilmiştir.
- Cila ramatının kral suyuyla liç adımı sürecince, yapılan azot oksit ölçümünün sıfır "0" değerini göstermesi, **sülfamik asit ile azot oksit indirgeme işleminin** başarılı olduğunu kanıtlamaktadır.
- Proses sonunda %99'un üzerinde altının geri dönüşümü sağlanmıştır. Bu sonuç, altın geri kazanımında **sülfamik asit** kullanımının olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir.
- Çalışanların sağlığını büyük ölçüde tehdit eden "cila ramatı prosesinin optimizasyonu iş sağlığı ve güvenliği açısından büyük önem arz etmektedir. Altının kral suyuyla çözünmesi işleminin kapalı sistemde, otomatik karıştırıcıyla yapılması sonucunda, çalışanlar asit kazanından sıçrayan asitlere maruz kalmayacak, ortamdaki tehlikeli asit buharları ve gazlarını da solumayacaklardır.


KAYNAKÇA


- [1] Who.int. (2019). *Ten health issues WHO will tackle this year*. <https://www.who.int/emergencies/ten-threats-to-global-health-in-2019> [Erişim zamanı; Ağustos, 10, 2019].
- [2] Toraks.org.tr. (2019). *Nefes Alamıyoruz: Partikül Madde Emisyonları Açısından Türkiye'de Hava Kirliliği* |

- Türk Toraks Derneği.*
<https://www.toraks.org.tr/news.aspx?detail=3772> [Erişim zamanı;Ağustos,13, 2019].
- [3] Odası, T. (2019). { HAVA KİRLİLİĞİ RAPORU } TMMOB Çevre Mühendisleri Odası. Cmo.org.tr.http://www.cmo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=97401&sube=0 [Erişim zamanı;Temmuz,18, 2019].
- [4] Earnshaw, A. and Greenwood, N. (2005). *Chemistry of the elements*. Amsterdam: Elsevier.
- [5] Vural, N. (2005). *Toksikoloji*. Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi.
- [6] Mansouri, A. (1985). Methemoglobinemia. *The American Journal of the Medical Sciences*, 289(5), pp.200-209.
- [7] Who.int. (2019). *WHO | Air quality guidelines - global update 2005*. https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/ [Erişim zamanı;Ağustos,22, 2019].
- [8] Warneck, P. (1999). Ch.9 Nitrogen Compounds in the Troposphere. In: *Chemistry of the natural atmosphere*, 71st ed. Elsevier.
- [9] Çetin, Ş. and Ayberk, S. (2007). Azot Oksit Emisyonları ve Çevresel Açidan Değerlendirilmesi. *Endüstri Otomasyon Dergisi*, 118, pp.22-26.
- [10] Richter, A. (2009). Nitrogen oxides in the troposphere – What have we learned from satellite measurements?. *The European Physical Journal Conferences*, 1, pp.149-156.
- [11] J. H. Withgott and S. R. Brennan, “Environment: The Science behind the Stories,” *Pearson*. <https://www.slideserve.com/tyne/lecture-outlines-chapter-17-environment-the-science-behind-the-stories-4th-edition-withgott> [Erişim zamanı;Eylül,11, 2019].
- [12] Erdem, B. (2006). *İkincil Kaynaklardan Altın Geri Kazanımı ve Rafinasyon Prosesinin Optimizasyonu*. Kimya-Metalürji Fakültesi, (yüksek lisans tezi). İTÜ, İstanbul/Türkiye.
- [13] Gündeş, A. (2015). Altın Üretiminde Kullanılan Kral Suyundan Sıvı Gübre Üretimi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(2), p.67.
- [14] Kuroпка, J. (2011). Removal of nitrogen oxides from flue gases in a packed column. *Environment Protection Engineering*, 37(1), pp.13-22.
- [15] Lyne, E.G., Berryman, A.B., Evans, C.M., Sampat, S., Jensen-Holm, H., “Advances in NOx removal in smelter acid plants”, Proc. Int. Seminar for New Initiatives in the Mining Sector) Chilean Copper Commission, Santiago (2002).

Termal Sprey Yöntemi İle Paslanmaz Çeliklerin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi

¹Yıldız Yaralı Özbek, ^{*2}Adalet Bozkan

¹Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Esentepe Kampüsü, 54187 Sakarya, Türkiye
yyarali@sakarya.edu.tr, 

², Tosyalı Holding, Osmaniye Organize Sanayi Bölgesi, 80950 Osmaniye, Türkiye,
adaletbozkan@gmail.com, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 31.05.2019

Kabul Tarihi: 19.06.2020

Öz

Bu çalışmada AISI 316 paslanmaz çeliğinin yüzey özelliklerinin atmosferik plazma sprej kaplama yöntemi kullanılarak iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Yüzey özelliklerini gelişimini ve değişimini inceleyebilmek için iki farklı kimyasal içeriğe sahip toz kullanılmıştır. Birincil toz karışımı %100 woka (Ni 78-82% Cr 18-22) 7202 tozu ve ikinci olarak %50 woka 7202 (Ni 78-82% Cr 18-22) -%50 diamalloy 2002(Ni 66%-Cr 18%) toz karışımı hazırlanarak kaplama yapılmıştır. Kaplama numunelerine mikroyapı incelemesi yapıp ve sonrasında optik görüntüleri alınmıştır. Kaplanmış numunelerin yüzeyinden içeriye doğru sertlik ölçümleri, XRD analizi, SEM analizi, EDS analizi yapılmış, 2D ve 3D yüzey pürüzlülüğü görüntüleri alınmıştır. Aşınma deneyi alümina bilya kullanılarak farklı hız ve yük parametrelerinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyi sonucunda EDS ve SEM analizleri ile aşınma yüzeyleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Termal sprej kaplama, aşınma, 316 paslanmaz çeliği, sertlik, yüzey

Improvement of Surface Properties of Stainless Steels by Thermal Spray Process

¹Yıldız Yaralı Özbek, ²Adalet Bozkan

¹ Sakarya University, Metallurgy and Materials Engineering Faculty, Sakarya, yyarali@sakarya.edu.tr
²Tosyalı Company, Osmaniye, adaletbozkan@gmail.com

Abstract

In this study, the recovery of surface properties of AISI 316 stainless steel was aimed by atmospheric plasma spray coating method. Two powder metal alloys with different chemical composition were used in order to investigate the change and development of surface properties. First powder mixture is 100 % woka (Ni 78-82% Cr 18-22) 7202, and the second one is composed of 50 % woka 7202 (Ni 78-82% Cr 18-22) and 50 % diamalloy 2002(Ni 66%-Cr 18%). The coated samples were exposed to microstructure investigations, microhardness measurements from surface to center, XRD, SEM and EDS analyses and the 2D and 3D surface roughness measurements were performed. In addition, all samples were exposed to wear test with different load and velocities by using alumina ball. The worn surfaces were detected by EDS and SEM analyses at the end of the wear test.

Keywords: Thermal spray coating, wear, 316 stainless steel, hardness, surface

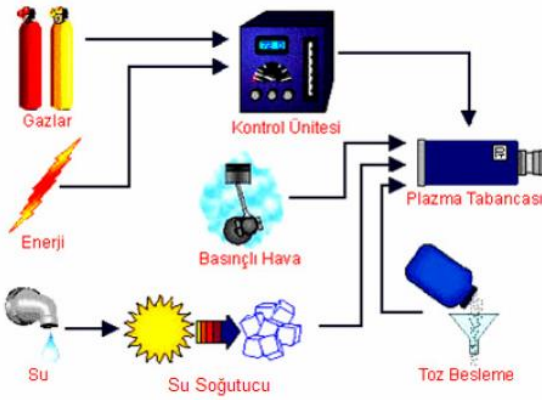
1.GİRİŞ

Malzemelerin korozyon direnci, yüksek sıcaklık, oksidasyon, yorulma ve aşınma dayanımı gibi yüzey

özelliklerinin iyileştirilmesi ve ortam koşullarından korunması maksadı ile geliştirilen uygulamalara kaplama veya yüzey işlem teknikleri denilmektedir [1,2]. Korozyona uğramış parçaların tamiri, aşınmış yüzeylerin iyileştirilmesi

*Sorumlu Yazar: Tosyalı Holding, adaletbozkan@gmail.com , 05468586626 / Tosyalı Company, adaletbozkan@gmail.com , 05468586626

ve endüstriyel parçaların korunması amacıyla kaplama teknikleri endüstride yaygın kullanım alanları bulmaktadır. Atmosferik plazma sprej kaplama yöntemi; malzemelerin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan ekonomik ve uygulama olarak yüksek sıcaklıklara çıkılabilen bir yüzey kaplama işlemidir. Bu yöntemle gerçekleştirilen kaplama ana malzemenin üstün özellikleri korurken aynı zamanda istenilen özellikleri de bir arada bulundurabilmektedir. Çok ince kaplama kalınlıklarıyla istenilen özellikler parçaya eklenmiş olur. Yüksek basınç uygulanarak argon, helyum, azot, hidrojen gibi inert gazlar kullanılarak mekanik, manyetik, elektrik, ısı, ışın enerjisiyle plazma formuna dönüşür. En çok kullanılan ve kolay olan yöntem ise gaz kütlesine elektrik vererek enerji oluşturmaktır. Plazma ile tüm malzemelerin katı formundan sıvı formuna dönüştürmek mümkündür. Bu sistemde gaz kaynağı, kontrol ünitesi, tabanca, nozul, toz besleme ünitesi, güç kaynağı bulunmaktadır.



Şekil 1. Plazma sprej kaplama sistemi ünitesi

Yapılan kaplamada porozite miktarının fazla olması, aşınma dayanımı, sertlik ve mukavemet özelliklerini negatif yönde etkilemekte fakat bazı durumlarda porozite yapıda istenmektedir. Termal izolasyon uygulamalarının yapıldığı uçak ve uzay sanayisinde porozite ısı yalıtımını sağladığı için istenen bir özelliktir. Toz partikül boyutunu büyük seçmek ve tabanca mesafesini uzun tutmak poroziteyi arttırmaya sebep olacaktır. Kaplamalarda diğer önemli faktör ise mukavemettir mukavemet özelliği kaplama kalınlığı gibi birçok özelliğe bağlıdır. Kaplama kalınlığı arttıkça mukavemet azalacaktır [3,4]. Gerilmenin artmasına bağlı olarak yapışma mukavemeti azalmaktadır. Elastisite modülü arttığında kaplamanın porozitesi artar, sertlik ve mukavemet düşer. Plazma sprej kaplama tabakaları heterojendir ve farklı kimyasal ve fiziksel özellik gösterirler [5].

Çok yüksek ergime noktasına sahip tozlar bu yöntemle kaplama malzemesi olarak kullanımına olanak sağlar. Malzemenin oksitlenmesi kullanılan inert gazlar sayesinde en aza indirilir.

Büyük boyutlu, karmaşık şekillerdeki ve farklı formlardaki

parçaların kaplamasına ve seri üretimine imkan tanır [5, 6]. Plazma sprej kaplama yöntemi kolaylıkla bütün sistemlere entegre edilebilir. Kaplamanın yapılacağı sistem çevreyle izole olduğu için çevre dostu bir yöntemdir. Kararsız karbür fazlarının oluşumuna neden olduğu için karbür esaslı malzemelerin mukavemet özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Kullanımında bir takım kısıtlar olmasına rağmen plazma sprej kaplama yöntemi birçok malzemeye uygulanabilir oluşu, hızlı ve ekonomik olması gibi sebeplerden dolayı endüstride çok yaygın kullanım alanı bulmaktadır.

Zor çalışma şartları altında malzemelerin ömrünün uzatmak için, borür, nitrür, karbür, intermetalik, oksit, esaslı kaplamalar tercih edilir. Vücut implantları için veya zarara uğramış parçaların kullanımını sağlamak için başvurulan yöntemlerdir. Endüstriyel olarak kullanım alanları: otomotiv, tıp, kimya, hidrolik makineler, cam endüstrisi, uçak ve uzay endüstrisi, nükleer teknoloji olarak belirtmemiz mümkündür.

AISI 316 paslanmaz çeliği iyi şekil verilebilir, iyi kaynak yapılabilir ve yüksek korozyon direncine sahip bir malzemedir. Paslanmaz çelikler yüksek korozyon direnci ve yüksek mekanik özelliklere sahip olmaları nedeniyle geniş kullanım alanına sahiptir. Yüksek oranlarda Cr ve Ni yapıda korozyon direncini arttırmaya karşın malzemenin işlenebilirliğini düşürmekte fakat ilave edilen bazı elementler sayesinde malzemenin korozyon direncinden herhangi bir şey kaybetmeden işlenebilirlik kabiliyeti artırılmaktadır. Kimya ve petrokimya endüstrisinde, gıda tesislerinde, buhar kazanlarında, aşındırıcı etkinin çok fazla olduğu tanklarda ve kazanlarda yaygın kullanıma sahiptir. Bu çalışmada iki farklı toz ile termal sprej yöntemi kullanarak kaplama yapılmış ve akabinde yüzey özellikleri ve aşınma özellikleri incelenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Deneyisel çalışmalarda; altlık olarak paslanmaz çelik seçilmiştir ve içeriği Tablo 1'de verilmektedir. Yapılan deney çalışmasında kaplama tozu olarak 2 farklı bileşiğe sahip toz karışımları kullanılmıştır. Kullanılan toz karışımının kütlece oranları Tablo 2.'de verilmiştir Toz 1; %100 Woka 7202 ve Toz 2; %50 Woka 7202 ile %50 Diamalloy 2002 toz karışımı kullanılarak atmosferik plazma sprej ile paslanmaz çelik yüzeylere kaplama işlemi yapılmıştır. Kaplanan yüzeye XRD analizi yapılarak meydana gelen fazlar incelenmiştir. Kaplanan yüzey özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi için SEM görüntüleri alınmıştır. Aşınma testleri 2N ve 3N yük ve mesafe olarak 100m için yapılmıştır. Aşınma Deneyleri esnasında hava sıcaklığı ortalama 25°C ve nem oranı %30 civarındadır. Yüzey pürüzlülüğünün malzeme aşınma direncine etkisinin incelenmesi için yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Aşınma deneyi ile numunelerin sürtünme katsayıları ve aşınma hacimleri hesaplanmıştır. Aşınan yüzeylerden SEM ve EDS analizi yapılmıştır.

Tablo 1. AISI 316 Paslanmaz çeliğinin kimyasal özellikleri

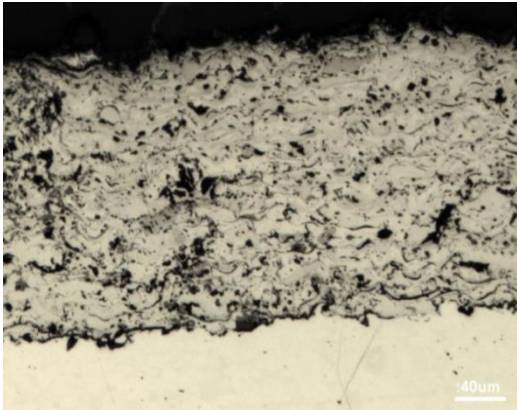
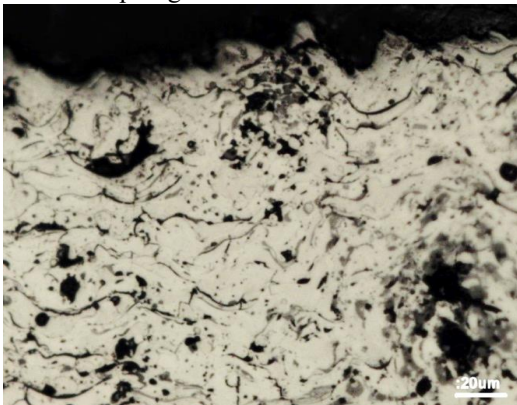
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
0,039	1,8116	0,6704	0,0323	0,0056	16,5397	10,2502	1,8877	0,2313

Tablo 2. Kullanılan tozların kütlece oranları

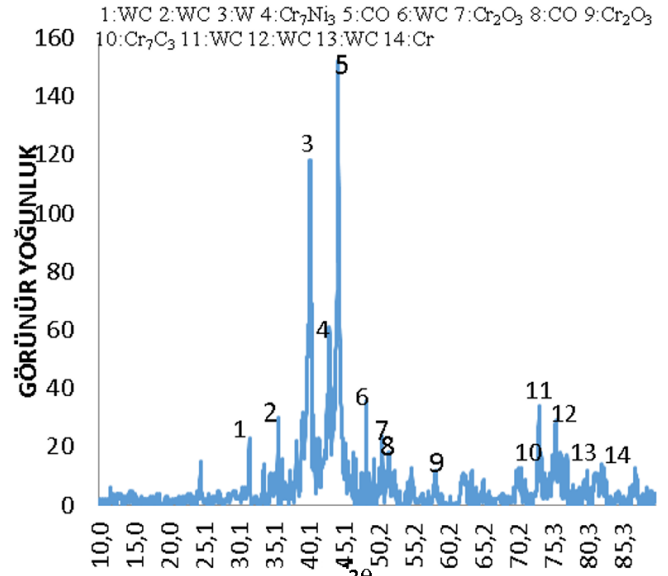
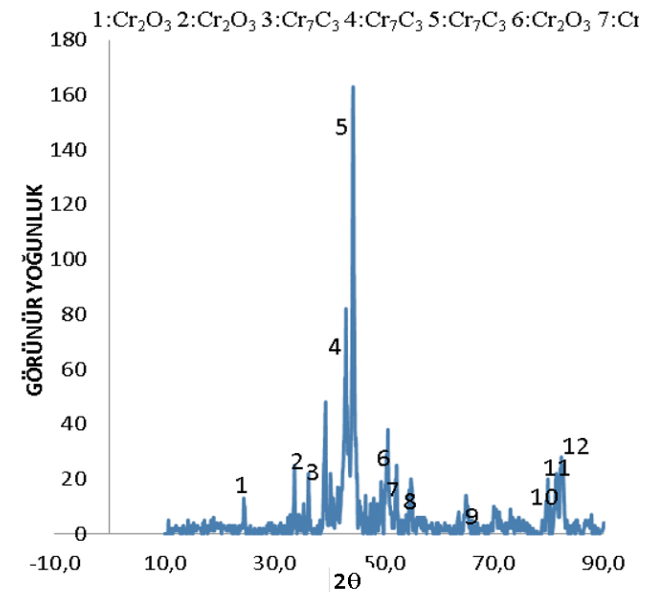
Toz-1	Toz-2
%100 Woka 7202 Cr ₃ C ₂ -25NiCr	%50 Woka 7202 Cr ₃ C ₂ -25NiCr
	%50 Diamalloy 2002 (WC12Co)

3. BULGULAR

Şekil 2 ve 3' de Toz 1 ve Toz 2 kullanılarak termal spray kaplama yapılan numunelerin kesit yapılarının optik mikroyapıları verilmektedir. Optik görüntülerden de anlaşılacağı üzere kaplama tabaka kalınlıkları tozların içerik durumuna göre değişiklik göstermektedir. %100 7202 Woka tozu kullanılarak yapılan kaplama işlemi kalınlığı 200 µm iken, %50 7202 Woka ve %50 2002 Diamalloy tozu kullanılarak yapılan kaplama işlemi kalınlığı 180 µm'dir. Yer yer ergimeyen tozlardan dolayı oluşan poroziteler göze çarpmaktadır. Genel olarak homojen denilebilecek bir kaplama tabakası görülmektedir.

**Şekil 2.** %50 7202 Woka tozu -%50 Diamalloy tozu 200x büyütmedeki optik görüntü**Şekil 3.** %100 7202 Woka tozu 200x büyütmedeki optik görüntüsü

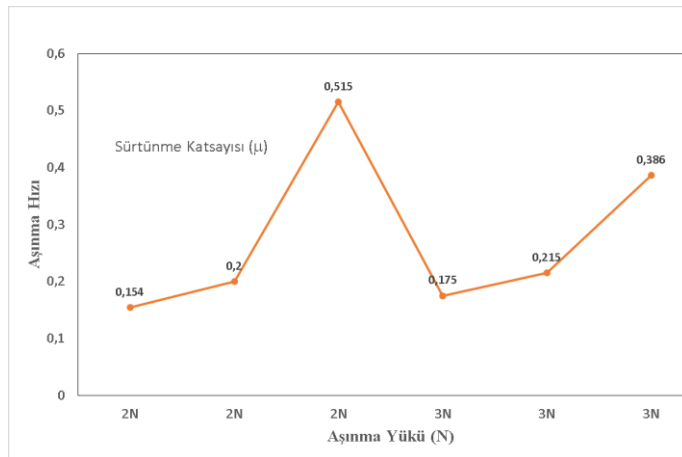
%100 7202 Woka tozu ve %50 Woka tozu ile %50 2002 Diamalloy tozu kullanılarak uygulanan atmosferik plazma sprey kaplı AISI 306 paslanmaz çeliklerinin XRD analizleri yapılmıştır (Şekil4-5). Kaplama ile numunelerin yüzeylerinde toz içeriklerinde bulunan elementler ve oksit yapılarına ait fazlar gözlemlenmiştir. Bu fazlar sert fazlardır. Bu fazların varlığı mekanik özelliklerinin gelişimi açısından son derece önemlidir. Tungsten faz içeriklerin varlığı yüzey mekanik özelliklerinin gelişimine katkı verecektir. Özellikle %50 7202-%50-2002 olarak karışım hazırlanmış toz yapısındaki sert fazlar yoğunudur.

**Şekil 4.** %50 7202 Woka tozu ve %50 2002 Diamalloy tozu kullanılarak hazırlanan karışımın kaplama numunesine ait XRD analiz sonuçları.**Şekil 5.** %100 7202 Woka tozu kullanılarak hazırlanan kaplama numunesine ait XRD analiz sonuçları.

Kaplama işlemi ile oluşan sert fazlar sebebiyle yüzeyde sertlik değerlerinde artış görülmüştür. Altlık olarak seçilen paslanmaz çeliğin sertliği 200 HV iken yapılan kaplama işlemi ile yüzeyde ki sertlik değerlerinde neredeyse 5 katlık bir artış meydana gelmiştir. %100-7202 woka tozunun sertlik değerleri 1022 HV iken karışım tozunun 1200 HV'dir. Bu sertlik artışı kaplama işlemi ile meydana gelen sert faz oluşumlarına atfedilmektedir.

3.1 Aşınma Testleri

Hız, yüzey pürüzlülüğü, malzeme sertliği, karşı yüzey malzeme cinsi, oluşan film tabakası, ortam şartları, uygulanan yük gibi parametrelere bağlı olarak sürtünme katsayısı değişiklik göstermektedir. Uygulanan yük artmasıyla sürtünme katsayısı ve aşınma oranında artış görülür. Yapı içerisinde oluşan karbür gibi sonradan oluşan fazlar da sürtünme katsayısını etkilemektedir. [7, 8, 10].



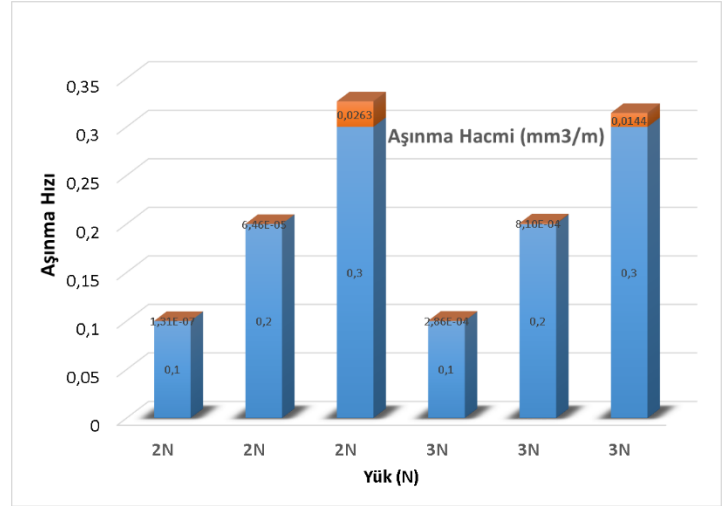
Şekil 6. 2N yük altında, 100m mesafede 0,1, 0,2 ve 0,3m/sn hızda aşınma sonucu numunelere ait sürtünme katsayısı-yük grafiği.

Şekil 6'da farklı yükler altında, 100 metre mesafede 0,1 m/sn 0,2m/sn ve 0,3m/sn hızda aşınma testlerinde sürtünme katsayılarının yük ve hız ile ilişkisi verilmiştir. %100 7202 woka tozu kullanılarak yapılan kaplamadaki sürtünme katsayısının karışıminkine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. XRD analizlerinden de görüldüğü üzere karışım tozu ile yapıda daha fazla sert faz tespit edilmiştir. Yapıdaki bu sert fazlar sürtünme katsayı değerlerinde pozitif bir etki yaparak düşüşe neden olmuştur[9]. 2N yük altında en yüksek sürtünme katsayısı görülmüştür. 0,3 m/sn hız ve 3N yük etkisi altında görülen sürtünme katsayısının düşüşünün sebebi yük artışıyla aşınma ürünleri numune yüzeyine sıvanmış ve sürtünme katsayısının düşüşüne neden olmuştur.

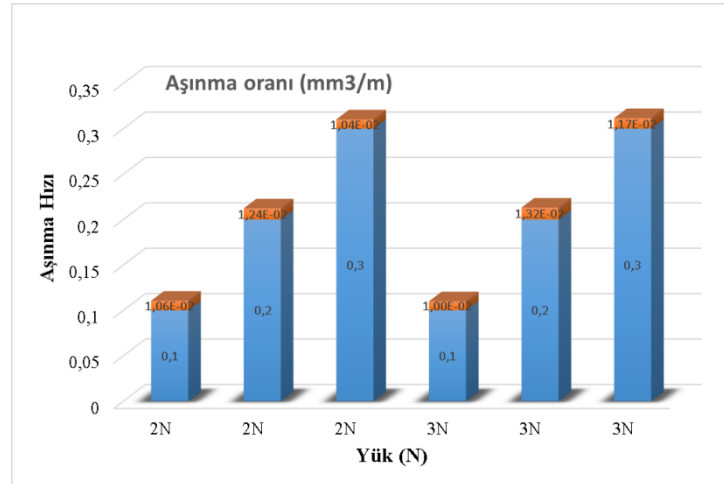
Ünal ve arkadaşları sürtünme katsayısındaki azalmaya yükün artış göstermesini neden olarak görmüşlerdir [12]. Kaplama tozlarının içerisinde Cr, Mo, W gibi karbür yapıcı elementler bulunuyorsa krom karbür, volfram karbür gibi çökeltiler oluşabilir ve bu durumda aşınma direnci arttırır. Yapıda ki karbür fazları abrasif aşınmaya direnci arttırmakta

fakat sertlik ve aşınma direnci arasında doğrudan bir ilişki bulunmamaktadır [13].

Uygulanan hız arttıkça kaplama yüzeyinde meydana gelen iz derinliği ve sürtünme katsayısı da artış göstermiştir. Bununla birlikte aşınma oranlarında da benzer durum söz konusudur.



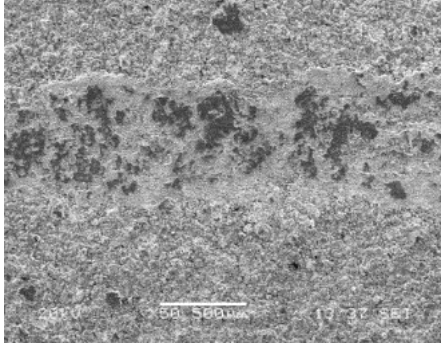
Şekil 7. %100 Woka 7202 tozu kullanılarak hazırlanan numunelerde 100 metre mesafede 0,1 m/sn, 0,2m/sn ve 0,3 m/sn hızlarda 2N, ve 3N yükler altında aşınma oranı grafiği



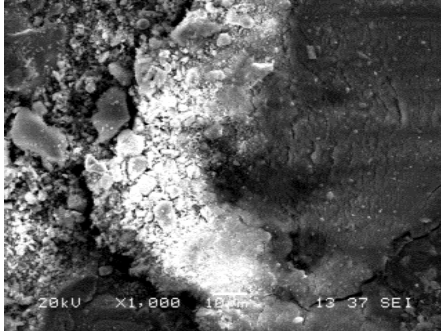
Şekil 8. %50 Woka 7202 -%50 Diamalloy 2002 tozları kullanılarak hazırlanan numunelerde 100 metre mesafede 0,1 m/sn, 0,2m/sn ve 0,3 m/sn hızlarda 2N ve 3N yük altında aşınma oranı grafiği.

Uygulanan yük arttıkça genel olarak aşınma oranında artış görülmüştür. Aynı şartlar altında hızın artmasıyla aşınma oranı benzer şekilde artış göstermiştir. Aşınma oranı %50 7202 woka tozu - %50 2002 diamalloy tozu kullanılarak yapılan kaplamalarda daha düşüktür. Karışım tozunun içerisinde var olan poroziteler kaplamanın aşınma dayanımını arttırmıştır. % 100 -7202 tozu kullanıldığında kaplama içeriğindeki porozite miktarı biraz daha düşük olduğu için bu tozla yapılan kaplamanın aşınma oranı daha yüksektir (Şekil 8).

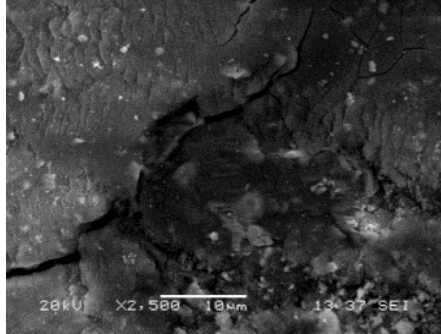
Şekil 9'da %50 Diamalloy 2002 ve %50 Woka 7202 tozları kullanılarak 2N yük altında 0,3 m/sn hızla 200 metre mesafede kaplanan numunenin SEM görüntüleri gösterilmiştir. Yüzeyde ki izlerden görüleceği üzere plastik deformasyon meydana gelmiştir. İnce kılcal çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Aşınma ürünleri yüzeyde görülmektedir. Kaplamada aşınma hızı yüksek olması sebebiyle ayrılmalarda meydana gelmiştir [14]. Hız artışı yüzeyde deformasyonu hızlandırmıştır.



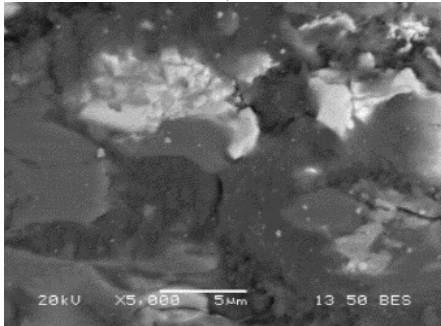
a)



b)



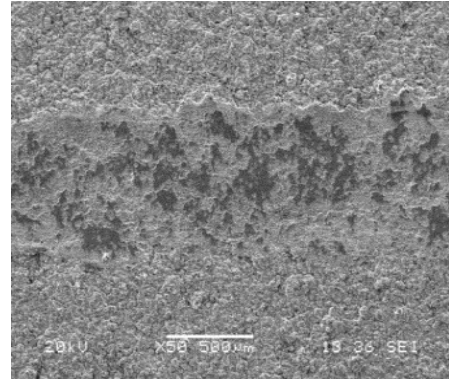
c)



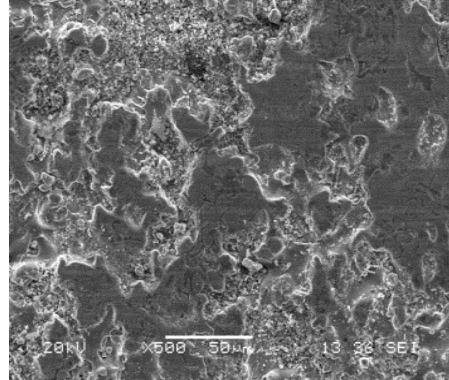
d)

Şekil 9. %50 Diamalloy 2002 ve %50 Woka 7202 tozları kullanılarak 2N yük altında 0,3 m/sn hızla 200 metre mesafede aşındırılan numunenin SEM görüntüleri.

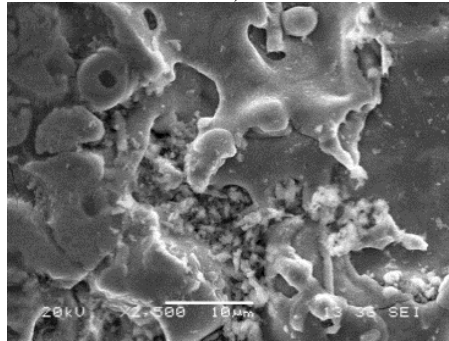
Şekil 10. %100 Woka 7202 tozu kullanılarak 2N yük altında 0,3 m/sn hızla 200 metre mesafede kaplanan numunenin SEM görüntüleri verilmiştir. Yüzeyde abrazif aşınma oluşumları görülmektedir [14].



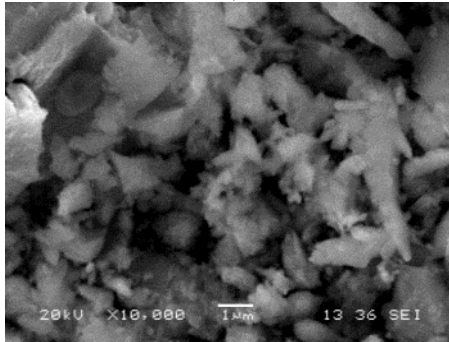
a)



b)



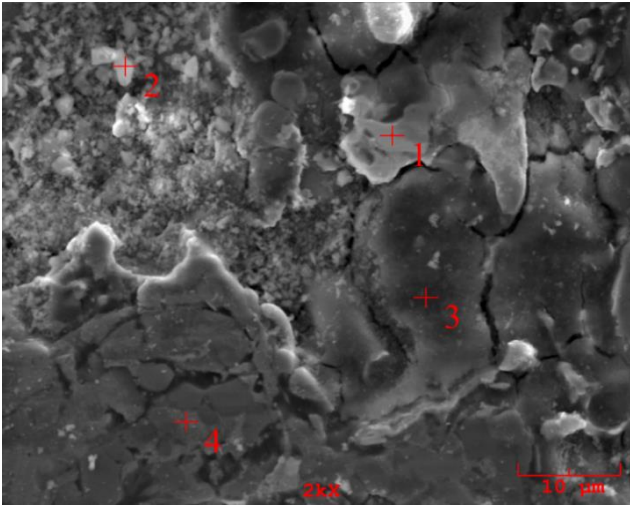
c)



d)

Şekil 10. %100 Woka 7202 tozu kullanılarak 2N yük altında 0,3 m/sn hızla 200 metre mesafede kaplanan numunenin SEM görüntüleri.

Şekil 11’de 2N yük altında 0,1 m/sn hızla 100 metre mesafede %50 Diamalloy 2002 ve %50 Woka 7202 tozları kullanılarak hazırlanan kaplama numunesinin EDS görüntüsü gösterilmiştir. Elementel analiz sonuçları Tablo 7’de verilmektedir. 1.bölgede çok yüksek miktarda W görülmesine rağmen yüzeyden içerilere doğru gidildikçe azalma eğilimi göstermiştir. 1. bölgede ağırlıkça çok az miktarda bulunan Ni elementi diğer bölgelerde artış göstermiştir. Oksijen elementi analiz sonucunda açık atmosferde yapıldığı için oksijenin var olması beklenen bir sonuçtur. Oksitlenme arttıkça daha fazla aşınma meydana gelecektir.



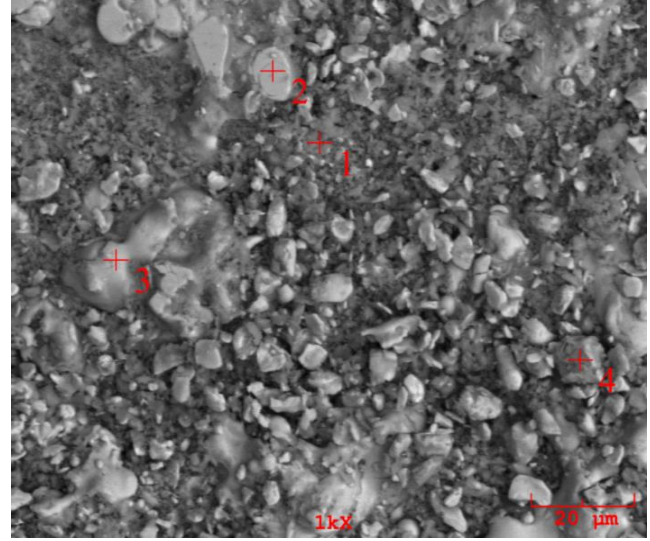
Şekil 11. 2N yük altında 0,1 m/sn hızla 100 metre mesafede %50 Diamalloy 2002 ve %50 Woka 7202 tozları kullanılarak hazırlanan kaplama numunesinin EDS görüntüsü.

Tablo 6. 2N yük altında 0,1 m/sn hızla 100 metre mesafede %50 Diamalloy 2002 ve %50 Woka 7202 tozları kullanılarak hazırlanan kaplama numunesinin 1, 2, 3 ve 4 no’lu noktalardan alınmış EDS analizleri.

No	%C	%O	%Al	%Cr	%Ni
1	0.327	22.926	0.395	64.385	11.966
2	2.860	8.550	0.154	66.674	21.762
3	1.512	21.848	0.178	61.400	15.063
4	0.209	5.890	0.060	75.591	18.251

Şekil 12. 2N yük altında 0,2 m/sn hızla 100 metre mesafede %100 Woka 7202 tozları kullanılarak hazırlanan kaplama numunesinin EDS görüntüsü gösterilmiştir. Analiz sonucu incelendiğinde (Tablo.7) yapı içerisinde Al elementi azalma eğilimi göstermiştir. Cr ve Ni elementleri ağırlıkça kullanılan tozun içeriğine bağlı olarak beklenen miktarlardadır. Açık atmosferde yapıldığı için yüzeyde oksijen birikmesi beklenen bir sonuçtur. Yapı içerisinde var olan WC aşınmaya karşı direnci arttırmaktadır. Aşındırıcı bilye olarak alümina kullanılmıştır bilyeden aşınmaya maruz kalıp bilyeden ayrılan ve sistemden uzaklaştırılmaması

parçacığın malzeme yüzeyinde olduğu gözlenirken oksit yapıların varlığı da belirlenmiştir. Yüksek miktarlardaki oksitlenme daha fazla aşınma kaybı anlamına gelmektedir.



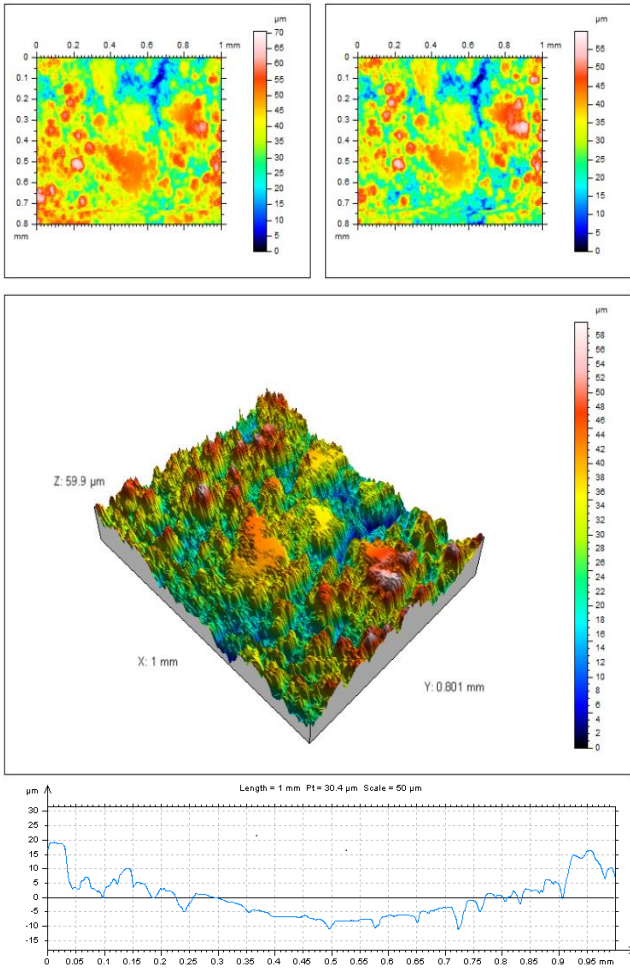
Şekil 12. 2N yük altında 0,2 m/sn hızla 100 metre mesafede %100 Woka 7202 tozları kullanılarak hazırlanan kaplama numunesinin EDS görüntüsü

Tablo 7. 2N yük altında 0,2 m/sn hızla 100 metre mesafede %100 Woka 7202 tozları kullanılarak hazırlanan kaplama

No	%C	%O	%Al	%Cr	%Fe	%Co	%Ni	%W
1	1.9 71	0.90 0	0.23 4	1.86 6	0.40 5	5.26 5	2.72 8	86.6 31
2	4.8 69	22.9 13	0.42 1	52.0 60	0.21 8	0.03 1	17.5 29	1.96 0
3	0.9 55	30.7 81	1.55 7	35.0 97	0.83 1	0.86 0	22.4 44	7.47 5
4	2.5 59	4.60 2	0.30 9	31.2 33	0.41 7	0.17 6	59.1 98	1.26 3

numunesinin 1, 2, 3 ve 4 no’lu noktalardan alınmış EDS analizleri.

Şekil 13’te %100 Woka tozu kullanılarak hazırlanan numunenin aşınma yüzeyinin küçük bir alanına ait 3 boyutlu pürüzlülük görüntüsü verilmektedir. Yapılan test sonucunda 3D optik yüzey profilometresi kullanılarak aşınma sonrası yüzey yapısı incelendiğinde homojen bir dağılımın söz konusu olmadığı görülmüştür. Uygulanan kaplama işlemi sonucu numune yüzeyinde 59,9 µm derinliğine sahip olan numunede yer yer yüzey derinlik farklılıkları mevcuttur. Aşınmanın kaplamada meydana getirdiği deformasyon iz derinliklerinin farklılığına sebep olmuştur. Kaplama üst yüzeyinden alınan görüntülerde yüzey topografyasında farklılıklar görülmektedir. Kırmızı renk en derin bölgeyi ifade etmektedir.



Şekil 13. %100 Woka tozu kullanılarak hazırlanan numunenin aşınma sonrası yüzeyden alınan 3 boyutlu pürüzlülük görüntüsü.

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Yapılan bu deneysel çalışmada, AISI 316 paslanmaz çelik yüzeyleri atmosferik plazma tekniği ile farklı tozlar ve toz karışımları kullanılarak yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. İlk kaplama numunesi tozu olarak %100 7202 woka tozu, ikincisinde ise %50 7202 Woka ve %50 2002 Diamalloy toz karışımı kullanılmıştır. Atmosferik plazma sprey kaplama yöntemi tercih edilmiştir yapılan deneysel çalışmalar sonucunda;

1-Metalografik incelemeler sonucunda, tabaka kalınlığının kullanılan toz içeriklerine bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Kaplama tabaka kalınlıkları %100 7202 Woka tozu kullanılarak yapılan kaplama işleminde 200 µm iken, %50 7202 Woka ve %50 2002 Diamalloy tozu kullanılarak yapılan kaplama işleminde 180 µm'dir.

2-Yüzeyde ergime ve birtakım bozulmalar gözlemlenmiştir. Özellikle %100 7202 Woka tozu kullanılarak yapılan kaplamalarda diğer karışım toz tabakasına göre daha poroziteli olduğu görülmektedir. Yer yer ergime problemleri oluşmuştur. Az oranda da olsa yer yer bu problem

görülmüştür. Tamamen düz ve homojen bir yüzey oluşmamasına neden olarak yüzeye püskürtülen tozların ergime noktalarının farklı olmasına bağlayabiliriz. Ergimelerde bazen cihaz kaynaklı sıkıntılar oluşabilmektedir.

3-SEM analizleri neticesinde yapıda gözenekli poroz yapıların mevcudiyeti söz konusudur. Buna oksijenin neden olduğu düşünülmektedir. Yapılan kaplama işlemi açık atmosfer şartları altında uygulandığı için EDS analizleri sonucunda oksijen elementine rastlanması beklenen bir sonuçtur. Poroz bir yapı olağandır.

4-XRD analizleri sonucunda kaplama tabakasında %50 7202 Woka tozu ve %50 2002 Diamalloy tozu kullanılarak hazırlanan karışımın WC, W, Cr₇Ni₃, CO, Cr₂O₃, Cr₇C₃, Cr bileşiklerinin oluştuğunu göstermiştir. Oluşan bu fazların varlığı aşınma dayanımını ve sertlik değerlerini artırmaktadır. Ayrıca numune pik şiddetleri değerlerinde değişikliğe yol açmış olduğu görülmüştür. En yüksek pike sahip olan fazlar W ve CO'dur. %100 7202 Woka tozu kullanılarak hazırlanan kaplama numunesinde oluşan fazlar ise Cr₂O₃, Cr₇C₃, Cr₂C₃, Cr'dur. En yüksek pike sahip olan faz miktarca da yüksek oranda bulunuyor demektir. Cr₂C₃ yapı içerisinde en fazla bulunan bileşiktir. Sertlik değerlerindeki artışa bu sert fazlar neden olabilir.

5-Kaplama yapılan numunelerden alınan mikrosertlik değerleri kaplama öncesine kıyasla arttığı görülmüştür. Kaplama yapılmadan alınan çelik sertlik değeri 200HV'dir. Kaplama tabakasının farklı bölgelerinden alınan ortalama mikrosertlik değerlerinde elde edilen en yüksek değer 1200 HV (%50 7202 Woka Tozu-%50 2002 Diamalloy Tozu), en düşük değer 1022 HV (%100 7202 Woka Tozu). Sertlik değerlerinin farklılığına sebep olarak toz içeriğinin farklı olması görülmüştür. Farklı toz karışımı ile yeni ve farklı sert fazlar oluşmuştur. Bu sert fazlar mikro sertlik değerlerinde pozitif bir eğilim sağlayarak artışa neden olmuştur.

6-Aşınma testi 2N, ve 3N yükler uygulanarak 0,1, 0,2 ve 0,3 m/sn hızlarda 100metre mesafelerde yapılmıştır. Yük arttıkça sürtünme katsayısında da artış gözlemlenmiştir. Bu deney sonucunda en düşük sürtünme katsayısı 2N yük uygulanarak 0,1 m/sn hızla 100 metre mesafedeki numunede 0,154 (µm) olarak ölçülmüştür. Yükteki azalma sürtünme katsayısında azalmaya neden olmuştur. Buna bağlı olarak aşınma oranlarını da etkilemiş olduğu düşünülmektedir. Hızın artmasıyla sürtünme katsayısının artması yüzeyde oluşan aşınma ürünlerinin varlığından dolayı olabilir. Oluşan sert fazlar sürtünme katsayısı değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Aşınma esnasında elde edilen aşınma ürünlerinde alümina bilyadan kopan parçaların miktarı fazladır. Açık atmosfer koşullarında yapıldığı için oksitlenen yüzeyler metallerin temasını engellediği için adhezyon aşınmasını azaltmaktadır.

7-Yapılan yüzey pürüzlülük test sonucunda 3D olarak yüzey yapısı incelendiğinde kaplama tabakasında homojen bir dağılımın söz konusu olmadığı görülmüştür. 3D

görüntülerde görüldüğü üzere aşınma yüzeylerinde plastik deformasyon oluşumları ve malzeme kopmaları gözlemlenmiştir. Derinlik farklılıkları vardır. Bu da bölgesel olarak aşınma oluşumuna verilen tepkisel farklılıktan kaynaklanmaktadır. Bölgesel olarak kaplamalarda kopmalar bu sebeptendir. Farklı renklerle ifade edilen kaplamada ki derinlik ve yükseklik ifadelerinden yüzeydeki aşınma oluşumları net bir şekilde görülebilmektedir.

5.KAYNAKÇA

- [1] A. Z. Bir, H.T. Kuloglu, Y. Baykal and Y. Cai, "Beam wander characteristics of cos and cosh-Gaussian beams," Appl. Phys. B, vol. 95, 763-771pp, May 2009.
- [2] U ÖZDEMİR, M ERTEN, "Plazma (İyon) Nitrürleme Yöntemi ve Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisi", Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 41-48pp, 2003
- [3] E.Çelik, "Yüzeylerin Kaplanması", Erdemir Bilim ve Teknoloji Serisi", 1-8pp, 2006
- [4] E ÇELİK, "Plazma sprey tekniğiyle üretilen seramik kaplamaların korozyon davranışlarının incelenmesi", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 1995.
- [5] H HERMANN, S SAMPATH, "Thermal spray coating", lesson note, State University of New York, 2008.
- [6] A. Ş DEMİRKIRAN, MgZrO₃ Esaslı Fonksiyonel Değişken Kaplamaların İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 1997.
- [7] B. Bhushan, "Principles and applications of tribology", John Wiley and Sons USA, 1020-1024pp, 1999
- [8] M.B Karamış, "Tribological behaviour of plasma nitrided 722M24 material under dry sliding conditions", Wear, 147, 385-399 pp, 1991
- [9] S.Jahanmir, "Wear Transitions and Tribochemical Reactions in Ceramics". Engineering Tribology, 216 (6), 371-385pp, 2002
- [10] Y.Q.Wang,, J. Li, "Sliding wear behavior and mechanism of ultra-high molecular weight polyethylene" Materials Science and Engineering, A266, 155-160pp, 1999
- [11] H.Ünal, U. Sen, A. Mimaroglu, Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counterface, Tribology International 37, 727-732pp, 2004
- [13] J.J Coronado, H.F Caicedo, A.L Gómez, "The Effects of Welding Processes on Abrasive Wear Resistance for Hardfacing Deposits", Tribol. Int., 42, 745-749pp, 2009
- [14] Y. Hao,B.Gao,G.F. TuS.W. LiS.Z. HaoC. Dong, "Surface modification of Al-20Si alloy by high current pulsed electron beam," Applied Surface Science Volume 257, 3913-3919pp, 2011

Physical Insights into the Bio-preservation of Proteins by Glassy Solvents: Why is Glycerol better than Trehalose at low Temperatures?

Taner E. Dirama

Neopol Global A.S., Istanbul, Turkey, taner.dirama@neopolglobal.com

Research Paper

Arrival Date: 23.10.2019

Accepted Date: 02.09.2020

Abstract

Biopreservation has been a critical area of technical and scientific research as it enables various forms of biomolecular therapeutic agents to find practical use in medicine. The mechanism at which biomimicry-inspired solutions to stabilize biomolecules has been of great scientific interest. We have studied the behavior of lysozyme immersed in glycerol and trehalose, two solvents frequently used in the bio-preservation of proteins, with the purpose of identifying the microscopic origins of their very different dynamical suppression capabilities. In agreement with experiments, we find that glycerol is superior to trehalose at low temperatures, although the latter is deeper in the glassy state, while trehalose is better at higher temperatures. We traced the basis of this phenomenon to the different temperature dependencies of the intermolecular hydrogen bonds between the model protein structure and the surrounding solvent.

Keywords: structural dynamics, protein, solvent, biopreservation

1. INTRODUCTION

Biomolecules are essential for life. They represent therapeutic agents and targets in treating various medical diseases and conditions. Biological activity and properties of biomolecules (e.g., deoxyribonucleic acid (DNA), ribonucleic acid (RNA), proteins) depend on their three-dimensional (tertiary) structure. The tertiary conformational structure also dictates the biological activity of proteins such as enzymes, transporters, growth factors, receptors, antibodies, and signaling molecules. When biomolecules are introduced into environments with high or low temperature, acidity, pressure etc., they can go through significant and irreversible conformational changes (i.e., denaturation) that make them biologically inactive.

Understanding the molecular basis of the denaturation process and the investigation of the stability of proteins is an active area of interest in biological physics[1], [2]. Such an understanding is crucial in the development of various biomedical applications.[3] In fact, the scientific knowledge in this field built over the years has resulted in many real-life applications such as in developing detection kits for antibiotics resistant bacteria[4], lyophilized preservation of bone morphogenetic protein[5], biopreservation systems to preserve not just proteins but also cells[6], and stabilization of lyophilized antibody powders[7]. It is now well established that many sugars and polyols act as cryoprotectants in various species[3]. Hence, they are used

in pharmaceutical applications of proteins as active ingredients. Their addition to the formulation help improve the stability of the active protein and extend the shelf life.

Among the various bio-preserving agents available, glycerol (1,2,3-propantriol) has proven to be very efficient in stabilizing the native state of proteins and the activity of enzymes at low temperatures.[8] Specifically, for low-temperature applications, glycerol has proven to be superior to other bio-preserving agents such as sugars. However, one sugar, trehalose (α -D-glucopyranosyl α -D-glucopyranoside), is known to be more effective than glycerol at room temperature and it has been reported to be the most effective bio-protecting agent by means of functional recovery[9]. On the other hand, studies of geminate CO combination to myoglobin in trehalose and glycerol environments showed significant differences in terms of reaction kinetics.[10], [11] Counterintuitively, the rebinding kinetics was found to be faster in trehalose than in glycerol at low temperatures (<215 K). The mobility of myoglobin was higher in trehalose than in glycerol. This experimental finding has posed an unanswered question of how glycerol is more effective than trehalose at low temperatures.

The biological function of proteins shown to be reliant on structural fluctuations among their various conformational sub-states[12]. Consequently, the study of the dynamics of proteins is valuable for the understanding of the biological

activity and the stabilization by the bio-preserving agents. Low-temperature Raman spectroscopy of lysozyme embedded in glycerol and trehalose has revealed that the former is a better bio-preserving agent than the latter even though trehalose is deeper in the glassy state.[13] On the other hand, trehalose was found to be more efficient at high temperatures. These results correlate with the kinetics of CO rebinding to myoglobin.[11] Namely, at low temperatures (< 200 K), glycerol inhibits the reaction kinetics more effectively. Caliskan et al.[13] argued that these counterintuitive findings in the dynamics of the protein are not due to the decoupling of protein-solvent interactions, rather the fragile character of trehalose. Namely, a lower energy barrier for conformational fluctuations in trehalose lead to a lower energy barrier for conformational fluctuations in the protein. However, experimental or theoretical evidence has not been presented and the nature of these interactions remains to be explored.

The main goal of this study is to identify and study the protein-solvent interactions based on the same model system (i.e., lysozyme in glycerol and trehalose) and to bring insights into to the peculiar influence of these two solvents on the dynamical behavior of proteins[14], [15] using Molecular Dynamics (MD) simulations.

2. MODELING AND SIMULATION METHOD

The simulations were performed AMBER molecular-dynamics package[16] with ff99 force field[17] to model lysozyme, trehalose and glycerol. The crystal structures of the solvent molecules (trehalose and glycerol) were optimized using the software package GAUSSIAN 03.[18] The same package was used to determine the electrostatic potentials on atom surfaces. The source of the 3-dimensional structure of our model protein (lysozyme, 193L) was retrieved a structural database.

The 6-12 Lennard-Jones potential was used for the van der Waals interactions. The Lennard-Jones parameters for the lysozyme-solvent interactions were calculated using the standard combination equations. The electrostatic interactions were determined using the particle-mesh Ewald method with a cutoff distance of 0.8 nanometers.

The initial velocities of atoms were assigned randomly using the Leap-frog Verlet algorithm. 1 fs of the simulation step size was used.

Rectangular and parallelepiped simulation box was created and periodic boundary conditions were used. Solvents were equilibrated at room temperature. The protein was placed in the middle of the simulation box after energy minimization.

The protein-solvent mixtures went through a series of equilibration steps in both the constant volume (first at 500 K and then at 300K) and the constant pressure conditions (0.1 MPa) for over 600 ps. After the equilibrium stages, the simulation was run at constant pressure conditions for over 2 nanoseconds.

The system was cooled down from an equilibrated state to low temperatures using 0.1 K/ps cooling rate for a 50K interval. Once the desired temperature has been reached, a further constant pressure equilibration simulation was run for 300 ps. Only after the system has reached the equilibrium, the data collection simulations were run.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In order to reveal the impact of solvents on the dynamics of our model protein, i.e., lysozyme, within a nanosecond (ns) time range, we compared the dynamics of lysozyme in each solvent. We compared the ratio of the mean square displacement ($\langle u^2 \rangle$) of lysozyme in glycerol to the one in trehalose at 1 ns resolution shown in Figure 1. Clearly, glycerol provides a better suppression of the dynamics as compared to trehalose at low temperatures in alignment with experimental studies[13].

We used incoherent intermediate scattering function ($S(q, t)$) in addition to $\langle u^2 \rangle$ to study lysozyme's dynamics. The formula for $S(q, t)$ is given below.

$$S(q, t) = \frac{1}{N} \left\langle \sum_{j=1}^N e^{i\mathbf{q} \cdot [\mathbf{R}_j(t) - \mathbf{R}_j(0)]} \right\rangle \quad (\text{Equation 1})$$

Here, \mathbf{q} is the scattering wave vector, t is time in n. N stands for the number of hydrogen atoms, $\mathbf{R}_j(t)$ is the three dimensional location of the j -th atom at time t . The brackets mean that the averaging takes place over time. This function presents important insights about the dynamic behavior and the relaxation of the biomolecule. Namely, since this function is presented over time scale, one can infer the various forms of relaxation from this representation such vibrations, conformational changes and translations.

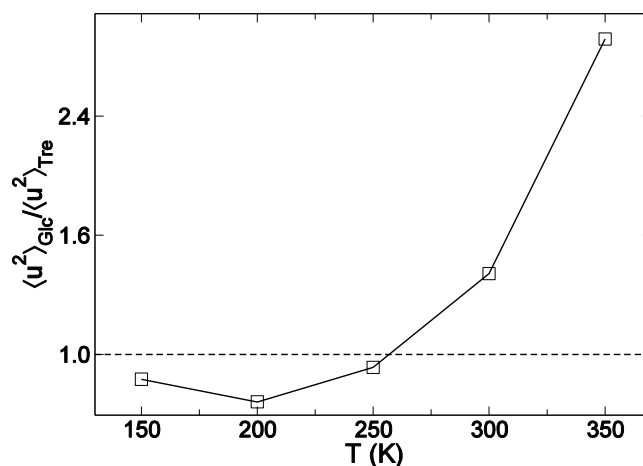


Figure 1. The ratio of $\langle u^2 \rangle$ for lysozyme hydrogen atoms in solvents at 5 different temperatures. Averaging of $\langle u^2 \rangle(t)$ was carried out over 1 ns.

It is clear that in Figure 2a (as also in Figure 1), at elevated temperatures (i.e., 300 K), the pico-nanosecond range

dynamics of lysozyme in glycerol is faster than in trehalose. The physical origin of this result is intuitively explained by the fact that the liquid nature of glycerol and the glassy behavior of trehalose at this temperature. Indeed, glycerol is well above its glass transition temperature (T_g) of 192 K, while trehalose is well below its T_g of 388 K. At this temperature, glycerol allows fluctuations among the conformational sub-states of the protein beyond the harmonic-like motions,[14] whereas trehalose prevents such motions and limits the dynamics to harmonic-like motions.[15] However, at lower temperatures the dynamic behavior of lysozyme reverses. Indeed, at 200 K lysozyme becomes slower in glycerol than in trehalose, although the latter is substantially deeper in the glassy state. This result agrees with experiments performed on the same systems and was attributed to the superior effectiveness of glycerol in the preservation of biological agents at low temperatures[13].

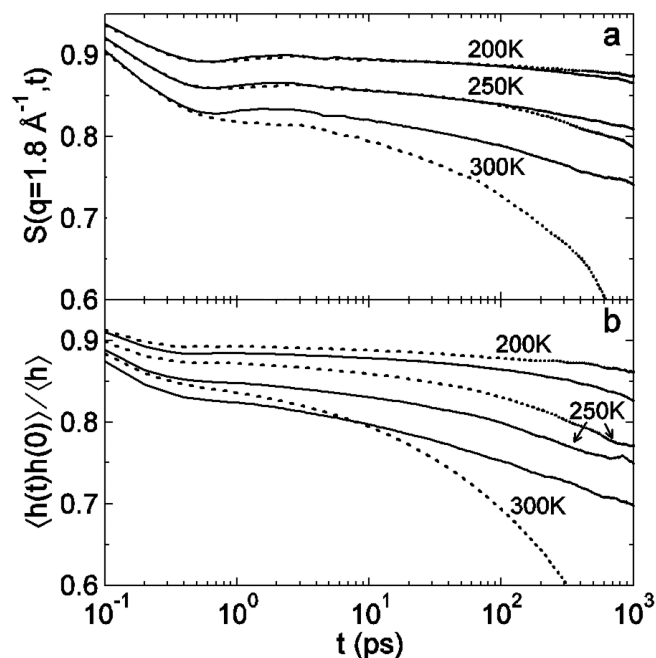


Figure 2c Figure 2a. $S(q, t)$ of lysozyme in trehalose (continuous lines) and glycerol (dashed lines) at three temperatures. b. HB correlation function for the hydrogen bonds between the protein and glycerol (dashed lines) and trehalose (continuous lines) at three temperatures.

While the conformational denaturation of proteins occurs at a time scale which is substantially longer than the resolution of the experimental measurements and the current simulation study, the protein motions at this shorter time scale could be precursors to larger scale conformational changes.[19] Firstly, it is known that the rapid and small scale atomic fluctuations in the native conformation of a protein play a key role in protein function.[20] Additionally, it has been shown that these fluctuations serve as a “lubricant” for larger scale motions such as perturbation of the average structure by the binding of ligands.[21], [22] This idea can further be clarified using the concept of the hierarchical arrangement of substates. Tier 0 refers to few unique conformations each corresponding to different biological functions. Each of

these tier-0 substates can assume many tier-1 statistical substates, which perform the same functions at varying rates. Since motions in tier-0 occur as a result of successive transitions among substates in tier-1, Fenimore *et al.* suggested that freezing out these transitions would prevent the occurrence of the motions in tier-0.[23] This idea could be extrapolated to the larger scale protein motions that exceed the transitions involving protein function and extending to the conformational denaturation. Namely, suppressing the atomic motions in pico-nanosecond time range might improve the conformational stability of the protein. Indeed, this idea has been supported by studies that combine the analysis of the short-time dynamics and the measurements of enzyme activities.[24] These ideas are also supported by our findings that the dynamics of lysozyme in the nanosecond time window correlate with the experimental findings of its stability embedded in the solvents.

The dynamics of proteins are greatly influenced by hydrogen bonds.[25] More specifically, it has been shown that before the relaxation of the protein could occur, the hydrogen bonding (HB) network (between the protein-solvent) has to go through a relaxation.[26] Since the solvents under the consideration are highly capable of establishing HB network, the conformational dynamics of such protein-solvent systems will naturally be affected by the hydrogen bonds at the protein-solvent interface. In fact, it has been shown that the dynamical behavior of the HB network present between the model protein and the first solvent layer dictates the structural relaxation of the entire model protein.[14], [15] Consequently, we studied the HB network based on a set of criteria involving distances and angles among atoms forming hydrogen bonds.[27] We analyzed the hydrogen bonds using a correlation function, $c(t)$.

$$c(t) = \frac{\langle h(t)h(0) \rangle}{\langle h \rangle} \quad (\text{Equation 2})$$

Here, $h(t)$ is 1 when a acceptor-donor pair satisfies the hydrogen bond criteria and it is 0 otherwise. Since $c(t)$ is time dependent, it indicates the probability that a random hydrogen bonded donor-acceptor at time zero is still bonded at time t . Therefore, the change of $c(t)$ quantifies the longevity of hydrogen bonds.

Figure 2b shows $c(t)$ for lysozyme in pure glycerol and in pure trehalose at different temperatures. The initial decline relates to the vibration of atoms and rotation of hydroxyl groups of solvent molecules which lead to short living hydrogen bonds (i.e., lifetimes < 1 ps). Therefore, they have limited influence over the dynamics of the model protein. On the other hand, the secondary decline observed at longer times relates to long-living hydrogen bonds. Since, these long-living hydrogen bonds have lifetimes that are similar to the structural relaxation of lysozyme (e.g. relaxation of $S(q, t)$), the secondary decline in $c(t)$ has important consequences on the dynamics of the protein. The comparison of the hydrogen bond correlation function with $S(q, t)$ shows a clear correlation between both functions. At

low temperatures, the efficacy of the HB network between lysozyme and glycerol is more robust than the one between lysozyme and trehalose, i.e. $c(t)$ for trehalose declines faster than for glycerol at long times. Whereas the opposite is true at 300 K. At intermediate temperatures (250 K), the strengths of HB networks for both systems are similar in line with the similar dynamics displayed by lysozyme in both solvents, Figure 2a.

These findings follow the findings of the work of Tarek and Tobias[26]. They find that the structural relaxation the protein associate with the dynamics of protein-solvent hydrogen bonds and infer that the hydrogen bonding relaxation is a priori for the structural relaxation of the protein [26].

We observe that the dynamic behavior of the protein-solvent HB network is has a determining role in the nature of the structural dynamics of the protein. We also infer that his relation can also include the bio-preserving capabilities of the solvent. To bring a deeper understanding to the effect of the HB network, we calculated the protein-solvent hydrogen bonds life-time. We calculated the occupancy and the mean HB lifetime (τ_{HB}) of the intermolecular hydrogen bonds. The occupancy means the average number of simulation steps during which a hydrogen bond existed. The averaging is done over hydrogen bonds. τ_{HB} is the occupancy multiplied by the simulation time step and divided by the number of times that the hydrogen bond is broken. These two quantities represent the strength of the hydrogen bonds since the frequency of occurrence and the duration of a hydrogen bond indicate the level of stability of the hydrogen bond. Figure 3 shows the results of this analysis. Observe that the results for glycerol decay at a faster rate than those for trehalose with increasing temperature. These different dependencies on temperature result in stronger lysozyme-glycerol hydrogen bonds at low temperatures ($T < \sim 250$ K) and weaker hydrogen bonds at high temperatures ($T > \sim 250$ K). The crossover seen at around 250 K implies that both solvents are equally effective at this temperature in suppressing the dynamics of the protein. This finding supports the results shown in Figure 1, where the relative dynamics of lysozyme in different solvents merge at 250 K. A comparison of important properties in relevance to the discussion is presented below in Table 1. It is clear that the dynamical parameters (i.e., τ_{HB} and occupancy) of the hydrogen bond network are as expected comparing their molecular weight and T_g for these molecules at 350K. Trehalose suppress the lysozyme's dynamics more effectively. The same parameters at 150 K, on the other hand, counterintuitively switch in order and glycerol suppresses lysozyme's dynamics more effectively. This observation is similar in essence to the experimental results of the rebinding kinetics of myoglobin [10], [11]. The rebinding kinetics was found to be faster in trehalose than in glycerol at low temperatures. Therefore, it is possible that the molecular mechanism of the switching we observe in this study might also be responsible in myoglobin kinetics and other biomolecules in similar systems[13].

Table 1

Molecule	MW (g/mol)	T_g (K)	τ_{HB} at 150 K (ps)	τ_{HB} at 350 K (ps)	Occ. at 150 K (%)	Occ. at 350 K (%)
Glycerol	92	192	780	3	95	14
Trehalose	342	388	490	8	92	52

The strong correspondence between the hydrogen bond analyses and the structural relaxation of the protein supports the idea that the HB network at the protein-solvent interface is accountable for the efficacy of glycerol at low temperatures. Lowering the temperature strengthens the intermolecular hydrogen bonds in glycerol solvent (between glycerol and lysozyme) at a faster rate than trehalose does. This is due to the fact that glycerol, a simple polyol with three hydroxyl groups attached to each carbon atom, with a T_g of 192 K has significantly higher degree of mobility to be able to form intricate HB network with the protein as compared to trehalose. Trehalose (a disaccharide connected by a glycosidic linkage) with a T_g of 388 K, loses its mobility at the glycosidic linkage hindering its ability to change its conformation and at the hydrogen bonding capable hydroxyl groups to be able to form and maintain long lasting hydrogen bonds to form an effective dynamics-suppressing network. Thus, even though glycerol has a significantly higher mobility in its pure form than trehalose, it is capable of suppressing protein dynamics more effectively due to its superior HB network forming capability.

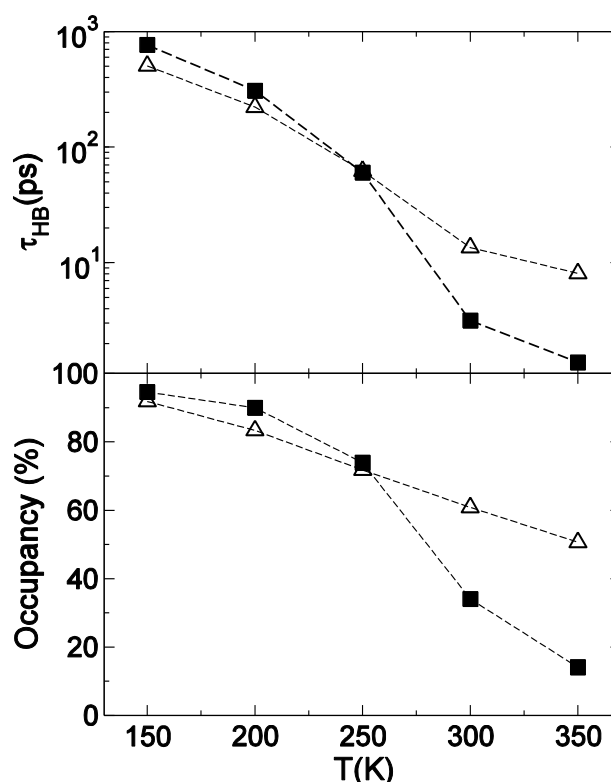


Figure 3. Lifetime (τ_{HB}) and occupancy for hydrogen bonds formed between lysozyme and glycerol/trehalose. Occupancy is presented as percent of the total number of simulation steps.

4. CONCLUDING REMARKS

We conclude that the HB network at the protein-solvent interface is responsible for the effectiveness of solvent in suppressing structural relaxation of the protein. The degree at which the solvents are able to form and maintain an intricate HB network dictates the relative effectiveness of the dynamical suppression. The effectiveness of this network is of such critical importance that it supersedes the relative internal mobility of the solvents.

It is important to note that there is a substantial difference in the time scales available to MD simulations and those involved in conformational denaturation of proteins. As the boundaries for the computational limitations expand the gap between these time scales will diminish. By then, the molecular simulations could clarify if there are other molecular mechanisms that are responsible for the conformational denaturation.

REFERENCES


- [1]. M. Tollinger, K. A. Crowhurst, L. E. Kay, and J. D. Forman-Kay, "Site-specific contributions to the pH dependence of protein stability," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 100, no. 8, pp. 4545–4550, 2003.
- [2]. T. J. Magliery and L. Regan, "Combinatorial approaches to protein stability and structure," *Eur. J. Biochem.*, vol. 271, no. 9, pp. 1595–1608, 2004.
- [3]. P. H. Yancey, "Organic osmolytes as compatible, metabolic and counteracting cytoprotectants in high osmolarity and other stresses," *J. Exp. Biol.*, vol. 208, no. 15, pp. 2819–2830, 2005.
- [4]. Mei Yang-woytowitz, Charles Yu, and Timothy Wiles, "Kits for the detection of beta-lactamases," 8389234.
- [5]. V. R. Garigapati, D. Su, R. Khanzada, and S. J. Sawamura, "Protein stabilization formulations," US8435943B2, 2013.
- [6]. Ali Eroglu, "Compositions and Methods for Biopreservation," US20190098891A1, 2018.
- [7]. H. Faghihi, S. Merrikhihaghi, A. Ruholamini Najafabadi, V. Ramezani, S. Sardari, and A. Vatanara, "A Comparative Study to Evaluate the Effect of Different Carbohydrates on the Stability of Immunoglobulin G during Lyophilization and Following Storage," *Pharm. Sci.*, vol. 22, no. 4, pp. 251–259, 2016.
- [8]. K. Gekko and S. N. Timasheff, "Mechanism of protein stabilization by glycerol: preferential hydration in glycerol-water mixtures," *Biochemistry*, vol. 20, no. 16, pp. 4667–4676, 1981.
- [9]. M. Uritani, M. Takai, and K. Yoshinaga, "Protective effect of disaccharides on restriction endonucleases during drying under vacuum1," *J. Biochem. (Tokyo)*, vol. 117, no. 4, pp. 774–779, 1995.
- [10]. R. B. Gregory, Ed., *Protein-solvent interactions*. New York, N.Y: M. Dekker, 1995.
- [11]. G. M. Sastry and N. Agmon, "Trehalose prevents myoglobin collapse and preserves its internal mobility," *Biochemistry*, vol. 36, no. 23, pp. 7097–7108, 1997.
- [12]. A. Ansari *et al.*, "Protein states and proteinquakes.," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 82, no. 15, pp. 5000–5004, 1985.
- [13]. G. Caliskan *et al.*, "Protein and solvent dynamics: How strongly are they coupled?," *J. Chem. Phys.*, vol. 121, no. 4, pp. 1978–1983, 2004.
- [14]. T. E. Dirama, G. A. Carri, and A. P. Sokolov, "Coupling between lysozyme and glycerol dynamics: Microscopic insights from molecular-dynamics simulations," *J. Chem. Phys.*, vol. 122, no. 24, p. 244910, 2005.
- [15]. T. E. Dirama, J. E. Curtis, G. A. Carri, and A. P. Sokolov, "Coupling between lysozyme and trehalose dynamics: Microscopic insights from molecular-dynamics simulations," *J. Chem. Phys.*, vol. 124, no. 3, p. 034901, 2006.
- [16]. David A Case, TA Darden, and J. W. Caldwell, "Amber 9," *Univ. Calif. San Franc.*, vol. 45, 2006.
- [17]. J. Wang, R. M. Wolf, J. W. Caldwell, P. A. Kollman, and D. A. Case, "Development and testing of a general amber force field," *J. Comput. Chem.*, vol. 25, no. 9, pp. 1157–1174, 2004.
- [18]. "Frisch, M.J., Trucks, G.W., Schlegel, H.B., et al., (2004) Gaussian 03, revision E. 01, Gaussian Inc., Wallingford CT. - References - Scientific Research Publishing." [http://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=631962](http://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=631962) (accessed Jul. 23, 2019).
- [19]. M. T. Cicerone, A. Tellington, L. Trost, and A. Sokolov, "Substantially improved stability of biological agents in dried form the role of glassy dynamics in preservation of biopharmaceuticals," *Bioprocess Int.*, vol. 1, no. 36, pp. 36–47, 2003.
- [20]. D. A. Waller, "Protein folding," *Biochem. Educ.*, vol. 21, no. 1, p. 50, 1993.
- [21]. T. Ackermann, "C. L. Brooks III, M. Karplus, B. M. Pettitt. Proteins: A Theoretical Perspective of Dynamics, Structure and Thermodynamics, Volume LXXI, in: Advances in Chemical Physics, John Wiley & Sons, New York 1988. 259 Seiten, Preis: US \$ 65.25," *Berichte Bunsenges. Für Phys. Chem.*, vol. 94, no. 1, pp. 96–96, 1990.
- [22]. R. V. Dunn, V. Réat, J. Finney, M. Ferrand, J. C. Smith, and R. M. Daniel, "Enzyme activity and dynamics: xylanase activity in the absence of fast anharmonic dynamics," *Biochem. J.*, vol. 346, no. 2, p. 355, 2000.
- [23]. P. W. Fenimore, H. Frauenfelder, B. H. McMahon, and R. D. Young, "Bulk-solvent and hydration-shell fluctuations, similar to - and -fluctuations in glasses, control protein motions and functions," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 101, no. 40, pp. 14408–14413, 2004.
- [24]. M. T. Cicerone and C. L. Soles, "Fast dynamics and stabilization of proteins: binary glasses of trehalose and glycerol," *Biophys. J.*, vol. 86, no. 6, pp. 3836–3845, 2004.
- [25]. W. S. Doster and M. Settles, "The dynamical transition in proteins: the role of hydrogen bonds," in *Hydration Processes in Biology: Theoretical and Experimental Approaches*, M.-C. Bellissent-Funel., vol. 305, Berlin: IOS Press, pp. 177–191.


[26]. M. Tarek and D. J. Tobias, "Role of Protein-Water Hydrogen Bond Dynamics in the Protein Dynamical Transition," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 88, no. 13, p. 138101, 2002.

[27]. M. Mezei and D. L. Beveridge, "Theoretical studies of hydrogen bonding in liquid water and dilute aqueous solutions," *J. Chem. Phys.*, vol. 74, no. 1, pp. 622–632, 1981.

Uyarlanabilir Çevrimiçi İngilizce Seviye Tespit Sınavı ile Türkiye'deki İngilizce Seviyesinin Analizi

*¹M. Fatih Adak, ²Mustafa Akpınar, ³Ali Uzunyolcu

¹Sakarya Üniversitesi, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, fatihadak@sakarya.edu.tr 

²Sakarya Üniversitesi, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, akpinar@sakarya.edu.tr, 

³Smart Eğitim, Kurucu Müdür, İstanbul, Türkiye, ali.uzunyolcu@smarteducation.net

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 09.03.2020

Kabul Tarihi: 25.08.2020

Öz

Globalleşen dünyamızda İngilizce artık dünya dili haline gelmiştir. Çoğu ülkede İngilizce; dili ana dil dışında, ikinci dil olarak öğretilmektedir. Gerek ülke politikaları olsun gerekse bireysel tercihler olsun İngilizce dilini öğrenmek için yüksek miktarlarda para harcanmaktadır. Bu alanda özellikle ülkemizde yapılacak çalışmalara, gerçekleştirilecek yatırımlara, karar verilecek politikalara ışık tutmak amacıyla bu çalışmada, ülkemizdeki İngilizce seviyesinin analizi yapılmış ve faydalı bulgular elde edilmiştir. Bu analizin yapılması için proje kapsamında geliştirilen uyarlanabilir İngilizce çevrimiçi eğitim sistemi kullanılarak çok fazla sayıda gerçek kişiye çevrimiçi seviye tespit sınavı uygulanmıştır. Türkiye'deki her bir şehir ve bölge açısından faydalı bilgiler elde edilmiştir. Genel anlamda İngilizce seviyesinin düşük çıktığı ülkemizde beceri bazlı analiz yapılmış ve durumun bazı beceriler açısından daha da kötü olduğunu görülmüştür. Yaş ve cinsiyet bazlı analizler yapılmış olup çalışmada detaylı grafikleri verilmiştir. Çevrimiçi seviye tespit sınavlarında sınav süresi önemli bir etken olduğu için bu çalışmanın ana amaçlarından biri, çevrimiçi seviye tespit sınavlarında makul süresi belirleyebilmektir. Yapay zeka tekniklerini de kullanarak bu süre kabul edilebilir düzeye düşürülebilir. Belli yaş grupları ve özelliklere göre sistem geliştirecek girişimcilerin, bu çalışmadaki analizleri dikkate alıp geliştirmeyi ona göre yapmaları maksimum fayda almada önem arz etmektedir.

Anahtar Kelimeler: İngilizce seviye, uyarlanabilir eğitim, seviye tespit sınavı, Türkiye'deki durum

Analysis of English Level in Turkey with Adaptive Online English Proficiency Exam

*¹M. Fatih Adak, ²Mustafa Akpınar, ³Ali Uzunyolcu

¹Sakarya University, Faculty of Computer and Information Sciences, Computer Engineering Department, Sakarya, Turkey, fatihadak@sakarya.edu.tr

²Sakarya University, Faculty of Computer and Information Sciences, Software Engineering Department, Sakarya, Turkey, akpinar@sakarya.edu.tr

³Smart Eğitim, Founding Manager, İstanbul, Turkey, ali.uzunyolcu@smarteducation.net

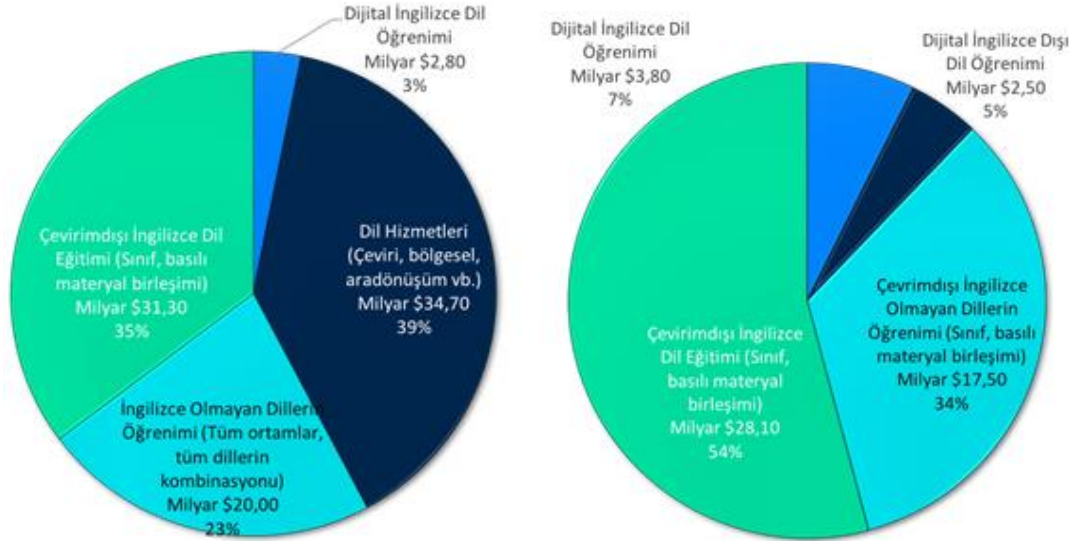
Abstract

In our globalizing world, English has become the world language. English in most countries; is taught as a second language besides the native language. High amounts of money are spent on English language learning, whether it is country policies or individual preferences. In this study, in order to shed light on the studies to be carried out, investments to be made and policies to be decided in this field, the level of English in our country was analyzed and useful results were obtained. In order to perform this analysis, using the adaptive English online education system developed within the scope of the project used and a huge number of real person online exam information was obtained. Useful information was obtained for each of the cities and regions in Turkey. In general, skill level analysis was conducted in our country where the level of English was low and it was found that the situation was even worse in terms of some skills. Age and gender analyze were made and detailed graphics were given in the study. One of the main objectives of this study is to determine the reasonable time in online placement exams, since the exam duration is an important factor in online placement exams. This period can be reduced to an acceptable level by using artificial

*Sorumlu Yazar: Sakarya Üniversitesi, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye Sorumlu yazar adres, fatihadak@sakarya.edu.tr

intelligence techniques. It is important that the entrepreneurs who will develop the system according to certain age groups and characteristics take into consideration the analyzes in this study and develop them accordingly.

Keywords: English level, adaptive learning, placement test, the situation in Turkey



Şekil 1. İngilizce dilinin küresel dil öğrenim endüstrisindeki yeri (soldaki 2015 yılı, sağdaki 2020 yılı öngörüsü)

1. GİRİŞ

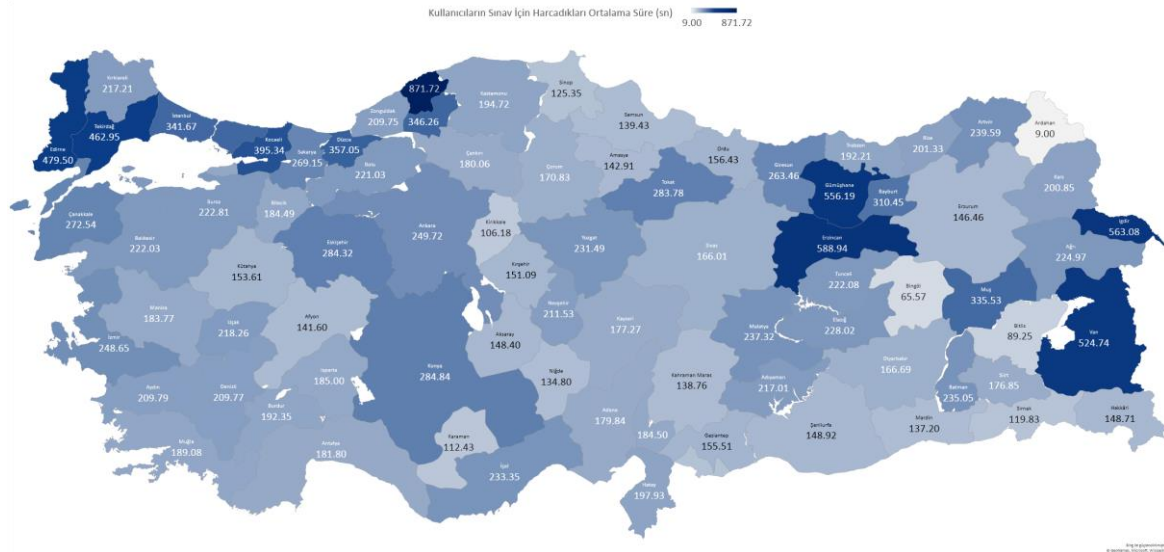
Gelişmekte olan birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de yabancı bir dili öğrenmek adına büyük zaman ve para harcanmaktadır. Fakat yoğun çalışma yaşamı ve eğitim hayatı; insanların dil öğrenimiyle ilgili zaman ayıramamasına sebep olmaktadır. Bu durumda da çevrimiçi sistemler önem kazanmaktadır. Yabancı diller arasında bilindiği üzere en büyük payı İngilizce almaktadır [1]. 2015 yılında gerçekleşen ve 2020 yılı için öngörülen İngilizce dilinin küresel dil öğrenim endüstrisindeki yeri Şekil 1.'de gösterilmiştir [2]. Yine Şekil 1.'den görüldüğü üzere 2015 yılında dijital İngilizce dil öğrenimi %3 iken 2020 yılında bu oranın %7'e gelmesi öngörülmüştür.

Bunun yanında İngilizce dil öğreniminde dijital satın alma yoluyla en çok harcama yapan ülkeler arasında Türkiye bulunmaktadır. Buna rağmen İngilizce yeterlilik endeksinde Türkiye neredeyse listenin sonundadır [2]. Yabancı dil öğreniminde çevrimdışı (sınıf, basılı materyal birleşimi) ve çevrimiçi olarak iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Günümüzde yaygınlaşan öğretim materyallerinin dijital öğrenme şeklinde olduğu ve hızlıca yaygınlaştığı görülmektedir. Dijitalleşmenin getirdiği fayda olarak erişimin kolay olması, süre kısıtlamasının olmaması, görsel ve işitsel yöntemlerle öğrenmeyi desteklemesi gösterilebilir. Sadece sınıfa ve bir yöntemle bağlı kalmanın çok başarılı olmadığı sınıf dışında da bu sürecin etkili bir şekilde devam ettirilmesi gerektiği vurgulanmıştır [3]. Uyarlanabilir eğitim sistemlerinin amacı öğrenme sürecini hızlandırmak ve kişiye özgü eğitim modeli sunabilmektir [4]. Ayrıca, bu çevrimiçi sistemler öğretmenin sınıftaki öğrencileri daha iyi analiz edebileceği eğitim performanslarını öğrenciye özgü çıkartabilecek bir model sunmaktadır [5], [6]. Geriye

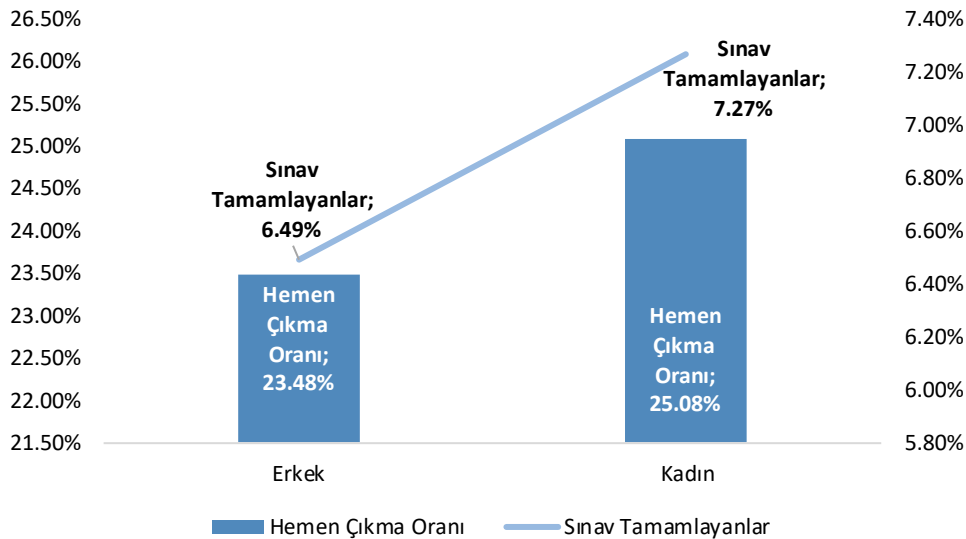
doğru birçok bilginin kaydedilebildiği ve analiz için büyük bir verinin olduğu düşünülürse kişideki başarısızlığın temel sebebi kolayca analiz edilebilir. Kişiyeye özgü müdahalenin yapılabileceği bu sistemler her yaşta bireyin eğitimi için önemlidir ve gelecekte vazgeçilmez bir duruma geleceklerdir.

1.1. Benzer Çalışmalar

Kişiyeye özgü eğitim modelleri literatürde incelendiğinde çok faydalı çalışmaların olduğu görülecektir. Kişileştirilmiş öğretim öğrenme stratejileri online eğitime yani bu çevrimiçi sistemlere entegre edilebilir [7]. Uyarlanabilirlikten kasıt bireylerin öğrenme stillerinin çıkarılması ve buna göre yol izlenmesidir. Çünkü öğrenme stillerinin bireylerin başarılarını etkiledikleri görülmüştür. Nakayama ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada her birey bir öğrenme karakteristiğinin olduğundan bahseder ve bu karakteristiğinin çevrimiçi eğitimde dikkate alınması gerektiğini belirtir [8]. İngilizce öğrenmeye başlama yaşı, başladığı mekan ve cinsiyet gibi parametrelerin İngilizce seviyelerinde etkili olduğu görülmüştür [9]. Sadece belli becerilere yoğunlaşan çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin okuma becerisinde bulanık mantık temelli uyarlanabilir bir model geliştirilmiş ve başarılı geribildirimler alınmıştır [10]. Yine bulanık mantık kullanan bir diğer örnekte anlaşılma konularının işaretlenmesi için kişiyeye özgü bir yaklaşım tercih edilmiştir [11]. Kişilik yapısını ve öğrenme stillerini temel alan bir diğer çalışmada veri madenciliği alanında karar ağaçlarını kullanarak uyarlanabilir eğitim süreçlerini tanımlamışlardır [12]. Web tabanlı eğitimler için uyarlanabilir ve akıllı teknolojiler alanında birçok modelin referans aldığı eğitim alanında kuvvetli dayanakları olan Brusilovsky yine bu sistemlerin önemini vurgulamıştır [13],



Şekil 4. Kullanıcıların Türkiye il bazında sınavda harcadıkları toplam süre ortalamaları

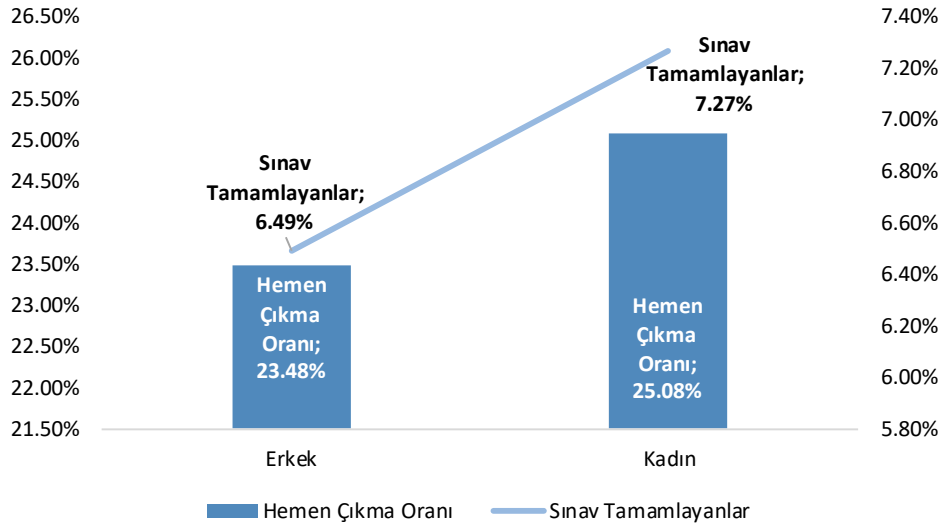


Şekil 5. Hemen çıkma ve sınavı tamamlama oranlarının cinsiyete göre dağılımı

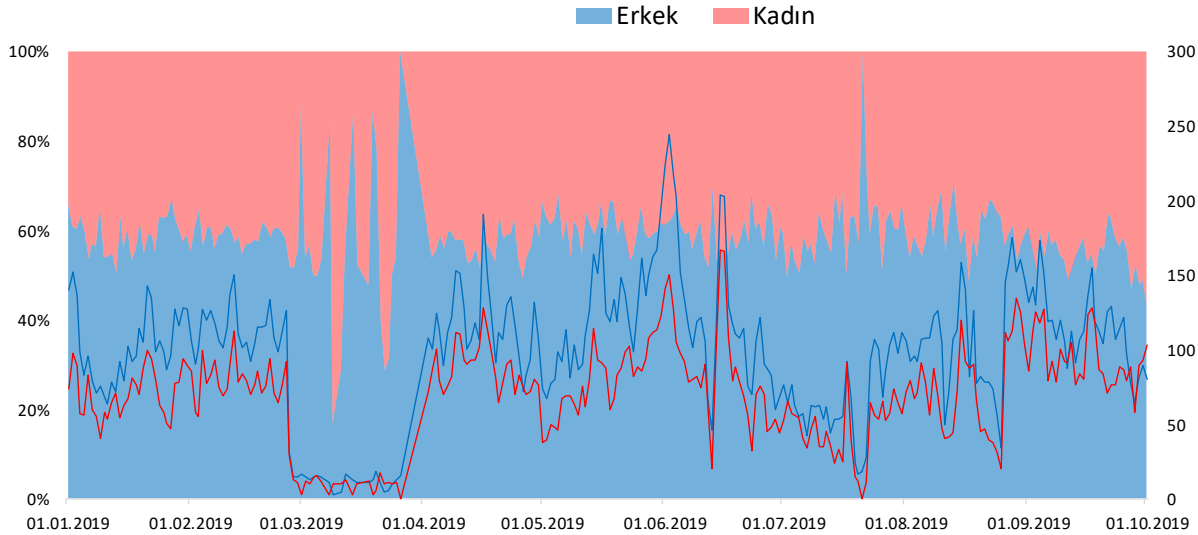
3.1. Cinsiyete Göre Dağılımlar

Bu çalışmadaki analizlere göre kullanıcıların sınavı tamamlama oranları ve hemen çıkma oranları cinsiyete göre Şekil 5.'te verilmiştir. Sol eksen hemen çıkma oranını gösterirken, sağ eksen sınav tamamlama durumunun oranını göstermektedir. Hemen çıkma oranı kullanıcıların sisteme giriş yaptıktan sonraki ilk soruda sistemi terk etmelerini belirtmektedir. Buna göre kadınların hemen çıkma oranı erkeklere göre %1,6 daha yüksek olmuştur. Sınav tamamlama durumunda ise kadınların erkeklerden %0,78 daha yüksek olduğu görülmektedir. Türkiye genelinde ise cinsiyetten bağımsız olarak hemen çıkma oranı %24,14, sınav tamamlama oranı ise %6,82 olmuştur. Bu durum; kadınların erkeklere göre sınavı eğer yapmak isterlerse daha ciddiye aldıklarını, fakat erkeklerin kadınlara göre sınavı başta ciddiye alıp sonrasında tamamlamadıklarını göstermiştir.

Kullanıcı sayıları ve ortalama oturum süreleri açısından cinsiyete göre dağılımlar Şekil 6.'da verilmiştir. Sol eksen kullanıcıların sayılarını gösterirken, sağ eksen ortalama oturum sürelerini göstermektedir. Sınavı tamamlayan 78.505 kişinin 35.925'inin cinsiyeti belirlenebilmiştir. Buna göre, cinsiyet bildirerek sınava giren erkeklerin sayısı kadınlardan 5940 daha fazladır. Sınav ortalama oturum süresinde ise kadınlar erkeklere göre 36 saniye daha uzun sınavda kalmıştır. Sınav süresi yaklaşık ortalama 270 saniye (4,5 dakika) olmuştur. Bu sayılara sınavı tamamlamayan ve hemen çıkan kullanıcılar da dahil edilmiştir. Kullanıcıların zamana bağlı seviye tespit sınavına giriş oranları cinsiyet kırılımında Şekil 7'de verilmiştir. 10 aylık süre boyunca erkeklerin sayısı %60 civarında olurken, kadınlar %40 oranında seviye belirleme sınavına girmişlerdir. Çizgisel grafik ise kadın-erkek günlük bazda sınava giren kişi sayılarını göstermektedir.



Şekil 6. Kullanıcı sayısının ve ortalama oturum süresinin cinsiyete göre dağılımı



Şekil 7. Kullanıcıların zamana bağlı seviye tespit sınavına giriş dağılımı

Grafiğin sol eksen alan grafiğinin oranlarını gösterirken, sağ eksen kullanıcı sayılarını göstermektedir. Buna göre günlük sisteme giren kullanıcı dağılımlarında erkeklerin kadınlara göre daha yoğun sınava girdiği görülmüştür. Seviye tespit sınavının herkese duyurulması için Google, Facebook, Instagram reklamları kullanılmıştır. İki ay boyunca reklamlar ile sınava girişler sağlanırken, mart ayında reklamlar kapatılmış ve reklamın etkisi sınanmıştır. Bir ay boyunca reklamsız olarak sınava ortalama günde 20 kişi giriş yaparken, reklamların bulunduğu zamanlarda günde 184 kişi giriş yapmıştır.

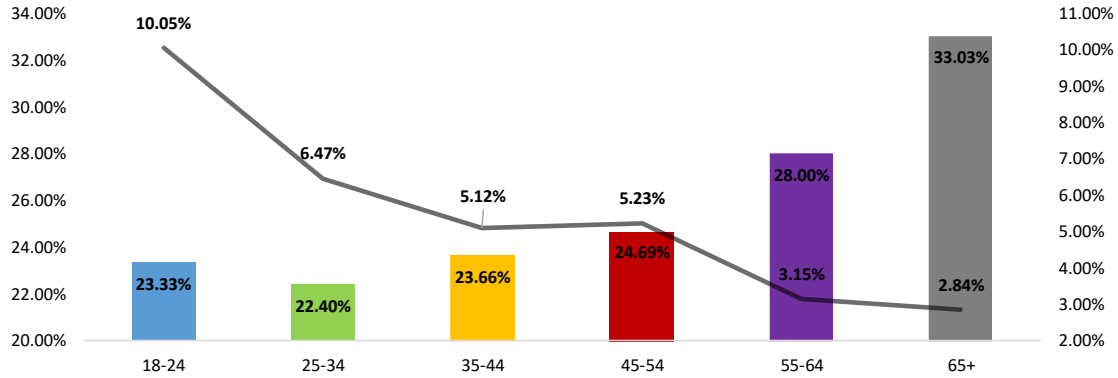
3.2. Yaş Gruplarına Göre Dağılımlar

Bu çalışmada yapılan analizin diğer önemli bir perspektifi yaş dağılımıdır. Yaşam boyu öğrenmenin popüler olduğu günümüzde, yaş ile seviye belirleme sınavındaki davranışın arasındaki ilişki ortaya konulacaktır. Sınav tamamlama ve hemen çıkma oranları yaş gruplarına göre Şekil 8'de

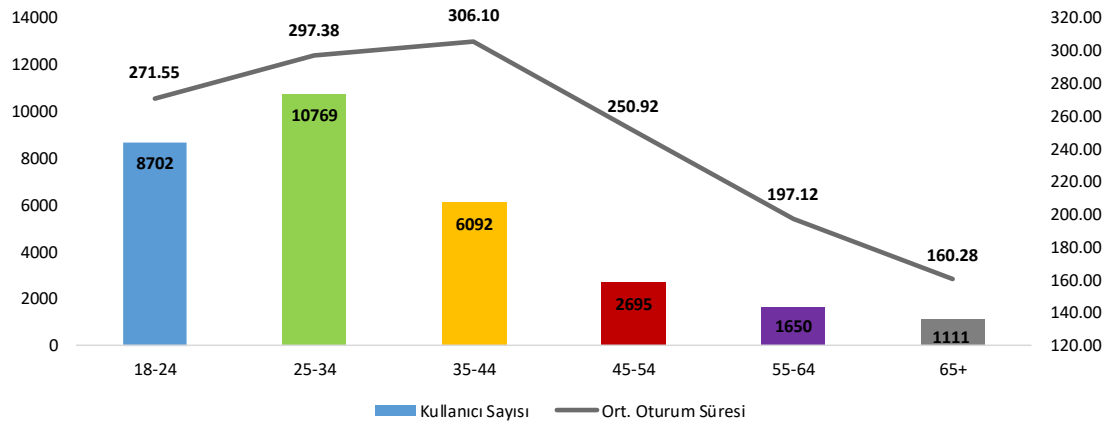
verilmiştir. Sol eksen hemen çıkma oranını gösterirken, sağ eksen sınav tamamlama durumunun oranını göstermektedir. Buna göre hemen çıkma oranı en düşük 25-34 yaş aralıklarında gerçekleşirken, en yüksek hemen çıkma oranı 65 yaş üstü kullanıcılarda gerçekleşmiştir. Sınav tamamlama durumunda ise 18-24 yaş aralığı %10,05 ile en yüksek tamamlama oranına sahipken, 65 yaş üstü %2,84 ile en düşük sınav tamamlama oranına sahip olmuştur. Bu verilerde yaş tespit edilemeyen kullanıcılar dahil edilmemiştir. Tüm yaş grubu tespit edilebilen kullanıcıların hemen çıkma oranı ortalaması %23,77, sınavı tamamlama ortalaması %6,68 olmuştur. 45 yaş ve üstü kullanıcıların sınavda sıkıldıkları sınav tamamlama oranındaki düşüklükten, isteksizlikleri ise hemen çıkma oranındaki yükseklikten görülebilmektedir. Kullanıcıların yaşlarına göre sayıları ve ortalama oturum süreleri Şekil 9'da verilmiştir. Sol eksen kullanıcıların sayılarını gösterirken, sağ eksen ortalama oturum süreleri göstermektedir. Toplamda yaş grubu belirlenebilen 31.019 kişi bulunmaktadır. Buna göre sınava giren kullanıcılar

arasında en yüksek sayıyı 25-34 yaş aralığı 10.769 kullanıcı ile almıştır. En düşük 65 yaş üstü kullanıcılar sınava girmiştir (1.111 kişi). Sınav ortalama oturum süresinde ise 35-44 yaş aralığındaki kullanıcıların 306,1 saniye ile en yüksek

sistemde kalma süreleri olduğu bulunurken, 65 yaş üstü kullanıcıların 160,28 saniye ile en düşük sistemde kalma süreleri olduğu görülmüştür.



Şekil 8. Kullanıcıların yaşa göre alınmış sınav tamamlama ve hemen çıkma oranları

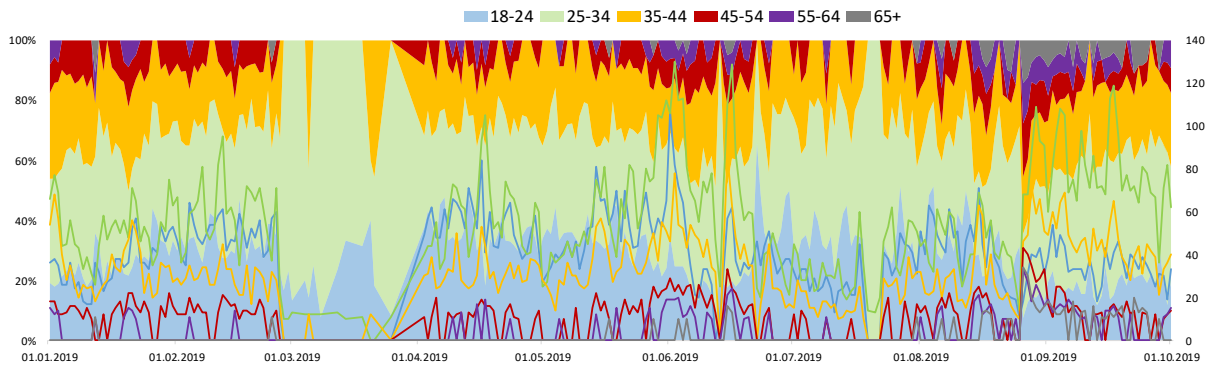


Şekil 9. Kullanıcıların yaşa göre sayıları ve ortalama oturum süreleri

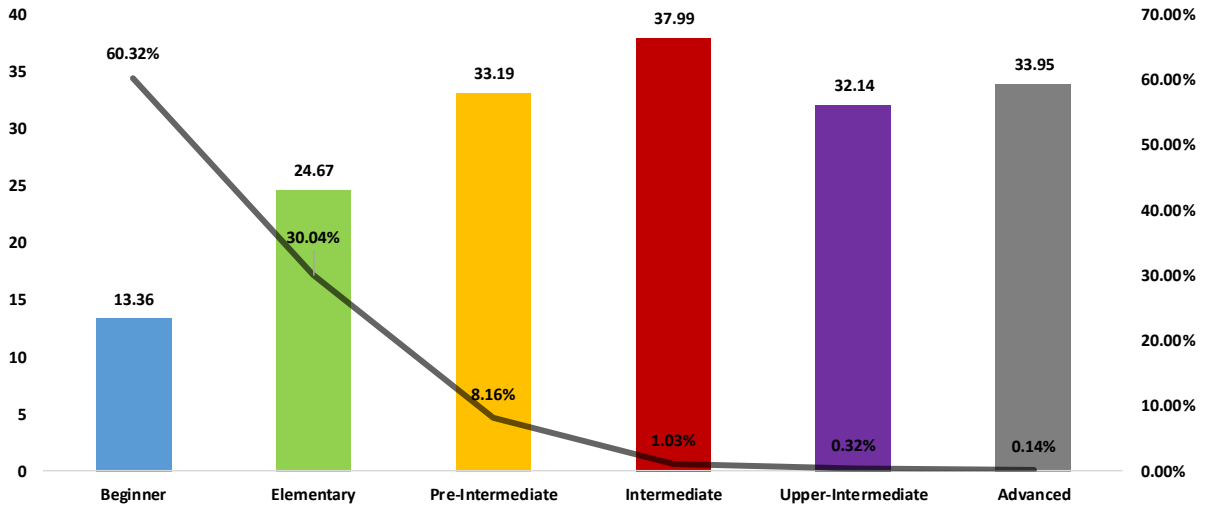
Şekil 9., 18-44 yaş aralığının sınavı tamamlamada istekli ve düzgün biçimde gerçekleştirdiğini gösterirken, 45 yaş ve üstü kullanıcıların sıkılgan ve isteksiz olduklarını göstermiştir.

Kullanıcıların zamana bağlı seviye tespit sınavına giriş oranları yaş aralıkları temelli olarak alan grafiği tipinde Şekil 10'da verilmiştir. Çizgi grafiğinde yaş aralık temelli günlük bazda sınava giren kişi sayıları gösterilmiştir.

Grafiğin sol eksenini alan grafiğinin oranlarını gösterirken, sağ eksen kullanıcı sayılarını göstermektedir. 10 aylık süre boyunca 25-34 yaş aralığının en yüksek oranda kullanıcılar olduğu görülürken (%34), 18-24 yaş aralığı kendisini takip etmiştir (%28). 65 yaş üstü aralık en düşük kullanıcıya sahiptir (%3). Yine mart ayında reklamların olmamasından dolayı sınavın gerçekleştirilme sayılarında düşüş meydana gelmiştir.

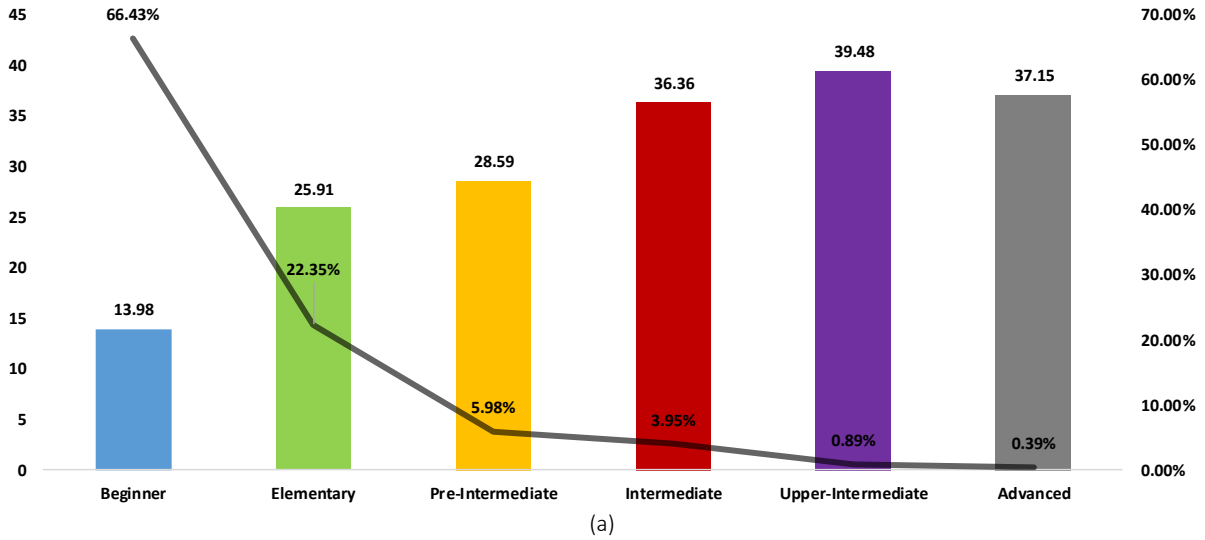


Şekil 10. Kullanıcıların yaşa göre sayıları ve zaman aralığı

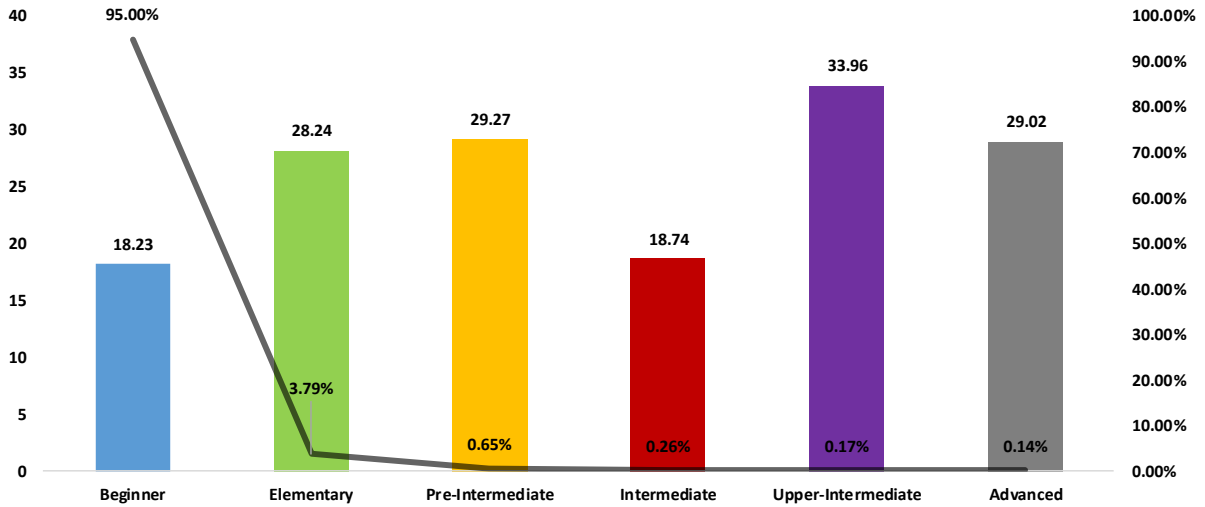


Şekil 11. Seviye tespit sınavına katılan bireylerin İngilizce seviyeleri

3.3. Seviyelerine Göre Dağılımlar



(a)



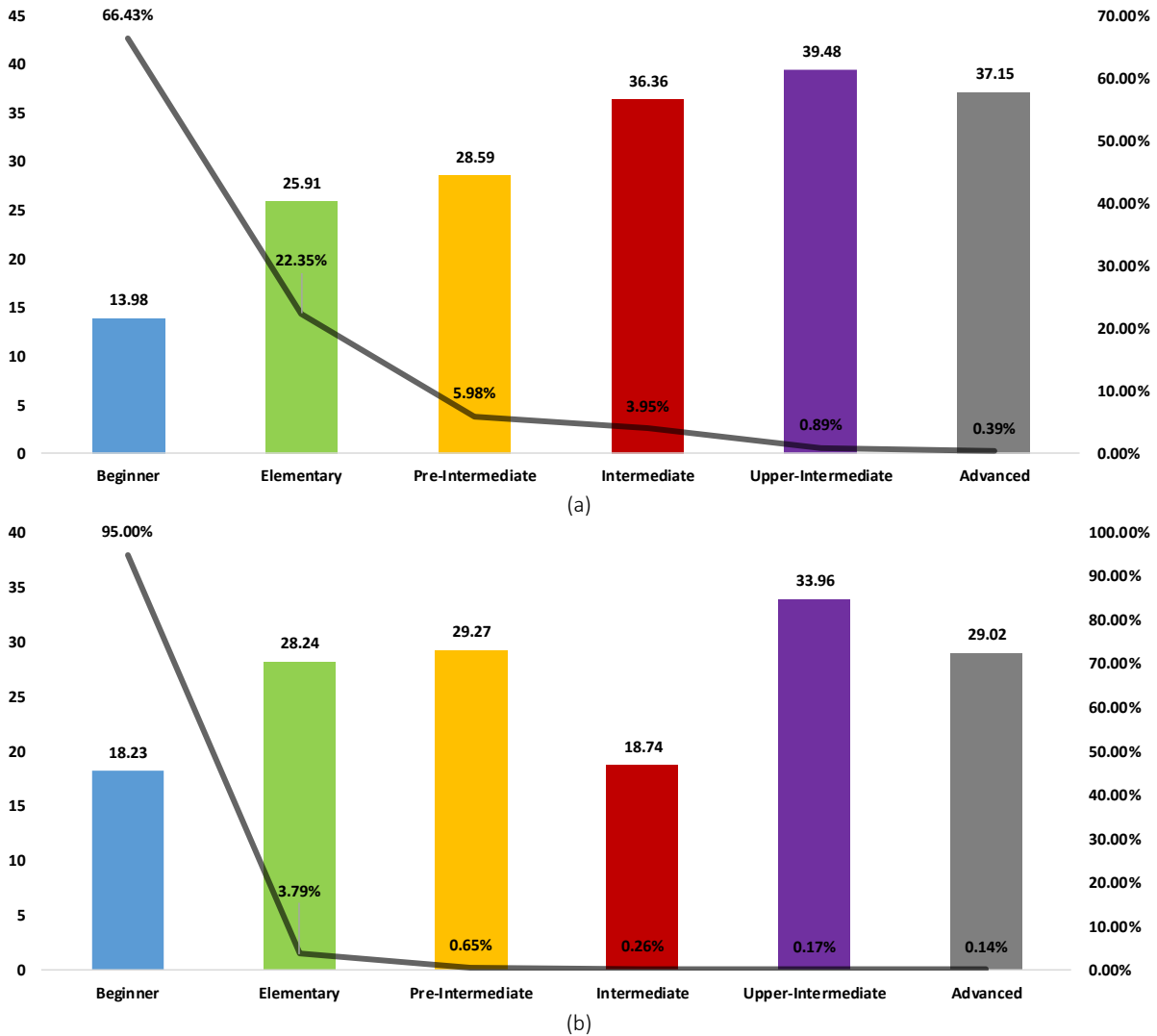
(b)

Şekil 12. Becerilere göre seviye dağılımları (a) Okuma , (b) dilbilgisi

Bu Yapılan çevrimiçi seviye tespit sınavında, sınava katılan bireylerin genel İngilizce seviyeleri Şekil 11’de verilmiştir. Ayrıca aynı grafikte sınav sürelerinin ortalaması gösterilmiştir. Sol eksen ortalama sınav süresini gösterirken, sağ eksen ilgili seviyedeki kullanıcıların yüzdesini göstermektedir. Şekilde istatistikleri bulunan kişiler sınavı tamamlamış kişilerden oluşmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre sınava katılan kullanıcıların %60,32’si Başlangıç (Beginner) seviyesinde olup, bunu %30 ile Temel (Elementary) seviye takip etmiştir. Kullanıcıların yaklaşık %8,2’si Alt-Orta (Pre-Intermediate) seviyesinde bulunmuştur. Orta (Intermediate) ve üstü seviyedeki kullanıcıların toplamı %2’nin altında kalmıştır. Sınavda geçirilen süre ele alındığında ise Orta (Intermediate) seviyedeki kullanıcıların ortalama 38 dakika ile en yüksek ortalama sürede sınavı tamamladıkları görülmektedir. Başlangıç (Beginner) seviyesindeki kullanıcılar ise sınavda ortalama 13,36 dakika harcamışlardır. Bunun sebebi sunulan modelde ilk 6 sorudan sonra başka soru görmemeleridir. Bu süre; başlangıç seviyesinin bir üstünde yer alan temel seviyenin neredeyse yarısı kadardır. Seviye belirleme

sınavında dil bilgisi, kelime bilgisi, dinleme ve okuma becerilerinin sınavıldığı unutulmamalıdır. Dinleme ve okuma aşamalarının süre üzerinde etkisi fazladır. Şekil 11’de yer alan seviye tespit sınavı sonucunda İngilizce seviyeleri verilen kullanıcıların beceri bazlı seviyeleri Şekil 12 ve Şekil 13’te verilmiştir. Şekil 12’de okuma ve dil bilgisi becerisine göre seviye dağılımları gösterilirken, Şekil 13’de kelime bilgisi ve dinleme becerilerine göre seviye dağılımları gösterilmiştir.

Şekil 12’de Sol eksen ortalama sınav süresini gösterirken, sağ eksen ilgili becerideki kullanıcıların yüzdesini göstermektedir. Sonuçlara göre sınava katılan kullanıcıların okuma becerisinde (Şekil.12(a)) %66,43’ü, dil bilgisi becerisinde ise %95’i Başlangıç (Beginner) seviyesinde sahip olup, bunu sırasıyla %22,35 ve %3,79 ile Temel (Elementary) düzey takip etmiştir. Orta (Intermediate) ve üstü seviyedeki okuma becerisine sahip kullanıcılar %10’nun çok az üstündedir. Dil bilgisi becerisinde ise Orta Alt (Pre-Intermediate) ve üstü seviyedeki kullanıcılar %1,22 oranında kalmıştır.



Şekil 13. Becerilere göre seviye dağılımları (a) Kelime bilgisi, (b) dinleme

Sınavda geçirilen süre ele alındığında ise Orta Üst (Upper-Intermediate) okuma seviyedeki kullanıcıların ortalama 39,48 dakikada sınavı tamamladıkları görülmektedir. Bu süre dilbilgisi becerisinde Orta Alt (Pre-Intermediate) seviyesi için sınavda geçirilen süre 18,74 dakika olmuştur. Sınav ortalama süresi için okuma becerisinde en yüksek Orta Üst (Upper-Intermediate) seviyesinde gerçekleşmiştir. Bu başarı grubu dilbilgisi seviyesinde de değişmemiştir ve en yüksek ortalama sınav süresine sahip olmuştur. Başlangıç (Beginner) seviyesindeki kullanıcılar ise okuma becerisinde sınavı ortalama 13,98 dakikada tamamlamışlar ve en düşük ortalama sınav süresine sahip olmuşlardır. Şekil 13'teki sonuçlara göre sınav katılan kullanıcıların kelime bilgisi becerisinde %93,61'i, dinleme becerisinde ise %61,65'i Başlangıç (Beginner) seviyesinde sahip olup, bunu sırasıyla %3,95 ve %14,31 ile Temel düzey takip etmiştir. Orta ve üstü seviyedeki dinleme becerisi kullanıcıların %15'e yakını oluştururken, kelime bilgisi becerisinde bu oran %1'in çok az üstündedir. Dinleme becerisinde yer alan sorularda sınırsız dinlenme hakkı verilmesinin ve sorudaki seçenek sayısının az olmasının buradaki kullanıcıların seviyesini yukarı çektiği öngörülmüştür.

Sınavda geçirilen süre ele alındığında kelime bilgisi ve dinleme becerileri birbirine yakın sonuçlar üretmiştir. Seviye arttıkça doğal olarak sınavda harcanan sürenin de artması beklenmektedir. Fakat kelime bilgisi becerisinde Orta (Intermediate) seviyesinde diğer tüm seviyeler göre daha fazla zaman harcandığı görülmüştür.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada iki ana unsur üzerinde durulmuştur. Birincisi beceri tabanlı ve kişisel özellikler ön planda tutularak seviye tespit sınavından alınan bilgiler ile analiz yapılmıştır. Diğer ana unsur çevrimiçi seviye tespit sınavının süresinin beceri bazlı hangi aralıklarda olacağını analizidir. Seviye tespit sınavlarında karşılaşılan problem birçok çalışmada seviye tespit sınavının basma kalıp bir şekilde yapılarak kişinin seviyesinin doğru belirlenmediği için sistem içerisinde yanlış konulardan başlayıp kişiyi sıkabilmesidir. Bu çalışmada geliştirilen uyarlanabilir seviye tespit sınavı yardımıyla kişisel özellikler dikkate alınarak en hızlı ve başarılı bir şekilde seviye tespiti yapılmış ve bireyler isabetli konulardan başlatılmıştır. Yine literatürde incelenen seviye tespit sınavlarında uzun sürenin bireyleri sıkıttığını ve sınavı erken terk etme gibi sorunların olduğu analiz edilmiştir. Bunun için bu çalışmada geliştirilen sistem sayesinde bu süre en optimum noktaya indirgenmiş ve sistemden ayrılma oranını dikkate değer bir şekilde düşürmüştür. Ülkemizdeki İngilizce seviyesi diğer ülkeler ile karşılaştırıldığında oldukça geri olduğu bilinen bir durumdur. Bunun sebeplerini araştıran birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada uyarlanabilir İngilizce seviye tespit sınavı uygulanmış ve analizleri çıkarılmıştır. Sınav girenlerin çok büyük bir kısmı başlangıç seviyesinde çıkarken bunun en büyük sebebinin dil bilgisi ve kelime bilgisi becerilerinin olduğu görülmüştür. Sınav girenlerin

çoğunun genç yaş nüfusu olduğu ve ülkemiz açısından 20-30 yaş grupları için ayrı plan-program yapılması gerektiği sonuçlardan elde edilmiştir. İngilizce seviye belirleme anlamında zeki bir model geliştirilecekse 15 dakika ya da maksimum 20 dakikada kişinin seviyesini belirlemelidir. Daha fazla süren çevrimiçi sınavlar kişiyi sıkmakta ve sınavı terk etmesine sebep olmaktadır. Sınav ilerleyişinde beceri bazlı yerine karma sistem tercih edilmesi sınavın terk edilmesinin önüne geçileceğini öngörmekte ve önerilmektedir. Böylelikle hem daha az soruda seviye belirlenebilirken hem de aynı tip soru sürekli arka arkaya gelmemiş olacaktır. Sınav başlamadan bazı kullanıcı özellikleri alınabilirse sınav ilerleyişi ona göre güncellenebilir. Örneğin; cinsiyete göre, sınav başlangıç beceri türü değiştirilebilir, eğitim düzeyine göre; sorularda kullanılacak resim ve materyal değiştirilebilir. Analizlerden bu gibi çıkarımlar elde edilmiştir. Günümüzde halen ciddi bir problem olan İngilizce eğitimi gelecekte de problem olmaya devam edecektir. Bu çalışmadaki ve bu çalışmadakine benzer analizler problemi çözmeye bir basamak teşkil edebileceğinden önemli analizler olduğu düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 1501 kapsamında gerçekleştirilen, 3180703'nolu projeden elde edilen sonuçlardan oluşturulmuştur. Çalışmaya katkılarından dolayı Smart Eğitim Çözümleri Sanayi ve Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- [1] M. Saville-Troike and K. Barto, *Introducing second language acquisition*. Cambridge University Press, 2016.
- [2] A. Insight, "The 2015-2020 Worldwide Digital English Language Learning Market," 2016.
- [3] H. Aydoğan and A. A. Akbarov, "The Four Basic Language Skills, Whole Language & Intergrated Skill Approach in Mainstream University Classrooms in Turkey," *Mediterr. J. Soc. Sci.*, May 2014, doi: 10.5901/mjss.2014.v5n9p672.
- [4] A. Pardo, "Designing Learning Analytics Experiences," in *Learning Analytics*, New York, NY: Springer New York, 2014, pp. 15–38.
- [5] M. Gusev and G. Armenski, "E-Assessment Systems and Online Learning with Adaptive Testing," 2014, pp. 229–249.
- [6] H.-K. Wu, C.-Y. Kuo, T.-H. Jen, and Y.-S. Hsu, "What makes an item more difficult? Effects of modality and type of visual information in a computer-based assessment of scientific inquiry abilities," *Comput. Educ.*, vol. 85, pp. 35–48, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.compedu.2015.01.007.
- [7] B. V. Koen, "Creating a Sense of 'Presence' in a Web-Based PSI Course: The Search for Mark Hopkins' Log in a Digital World," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 48, no. 4, pp. 599–604, Nov. 2005, doi: 10.1109/TE.2005.850712.
- [8] M. H. R. Nakayama, "The Impact of Learner Characteristics on Learning Performance in Hybrid Courses among Japanese Students.," *Electron. J. e-Learning*, vol. 5, no. 3, pp. 195–206, 2007.

- [9] F. Karahan, "Language attitudes of Turkish students towards the English language and its use in Turkish context," *Cankaya Univ. J. Arts Sci.*, vol. 1, no. 7, pp. 73–87, Aug. 2007.
- [10] T.-C. Hsieh, T.-I. Wang, C.-Y. Su, and M.-C. Lee, "A Fuzzy Logic-based Personalized Learning System for Supporting Adaptive English Learning," *J. Educ. Technol. Soc.*, vol. 15, no. 1, pp. 273–288, 2012.
- [11] C. Troussas, K. Chrysafiadi, and M. Virvou, "An intelligent adaptive fuzzy-based inference system for computer-assisted language learning," *Expert Syst. Appl.*, vol. 127, pp. 85–96, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.eswa.2019.03.003.
- [12] Y. Wang, M.-H. Tseng, and H.-C. Liao, "Data mining for adaptive learning sequence in English language instruction," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 4, pp. 7681–7686, May 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2008.09.008.
- [13] P. Brusilovsky and E. Millán, "User Models for Adaptive Hypermedia and Adaptive Educational Systems," in *The Adaptive Web*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 3–53.
- [14] P. Brusilovsky, "From Adaptive Hypermedia to the Adaptive Web," 2003, pp. 21–24.
- [15] "Anki." [Online]. Available: <https://apps.ankiweb.net/>.
- [16] J. YANG and J. PARK, "Software Review: SuperMemo UX-Extreme English Advanced and Proficient," *CALICO J.*, vol. 29, no. 4, pp. 718–726, 2012.
- [17] B. McLaren, "Adaptive Online Learning The Present and Future of Education," Wiley, 2013.
- [18] "Duolingo." [Online]. Available: <https://tr.duolingo.com/>. [Accessed: 27-Jan-2020].