

000110

# Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi Konya Journal of Engineering Sciences

HONJES 055

2019 - Cilt : 7 Sayı : 3 2019 - Volume : 7 Issue : 3

#### KONYA JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES (KONJES) KONYA MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

#### HAKEMLİ DERGİDİR

**OWNER/SAHİBİ** 

Owner on Behalf of Engineering and Natural Sciences Faculty of Konya Technical University **Prof. Dr. Ferruh YILDIZ** Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Adına Dekan **Prof. Dr. Ferruh YILDIZ** 

> Chief Editor/Şef Editör Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

#### Editors/Editörler

Prof. Dr. Mustafa TABAKCI Assoc. Prof. Dr. Halife KODAZ Assist. Prof. Dr. Omer Kaan BAYKAN

#### Section Editors/Alan Editörleri

Prof. Dr. Halil Kursad ERSOY Prof. Dr. Ihsan OZKAN Prof. Dr. Mustafa TABAKCI Assoc. Prof. Dr. Ahmet Afsin KULAKSIZ Assoc. Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN Assoc. Prof. Dr. Volkan KALEM Assist. Prof. Dr. Alpaslan YARAR Assist. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN Assist. Prof. Dr. Selim DOĞAN

# Advisory Board/Danışma Kurulu

Prof. Dr. Dervis KARABOGA, Erciyes University Prof. Dr. Ibaraki SOICHI, Kyoto University Prof. Dr. Matchavariani LIA, Tbilisi State University Prof. Dr. Seref SAGIROGLU, Gazi University Prof. Dr. Vijay P. SINGH, Texas A and M University Prof. Dr. Ercan AKSOY, Bitlis Eren University Prof. Dr. Lena HALOUNOVA, Czech Technical University Prof. Dr. Petros PATIAS, The Aristotle University Prof. Dr. Sitki KULUR, Istanbul Technical University

### Language Editing/Yabancı Dil Editörü Prof. Dr. Ali BERKTAY

Composition and Printing/Baskı ve Dizgi Res. Assist. Ismail KOC Res. Assist Emir Ali DINSEL Res. Assist. Aybüke BABADAG

#### Correspondance Address/ Yazışma Adresi

Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Dekanlığı 42075-Kampüs, Selçuklu, Konya-TURKEY

 Tel
 : 0 332 223 88 18

 Fax
 : 0 332 241 06 35

 E-mail
 : konjes@ktun.edu.tr

 Web
 : http://dergipark.org.tr/konjes

#### **Editorial Board/Yayın Kurulu**

Ahmet Afsin Kulaksiz, Konya Technical University, TURKEY Alla Anohina-Naumeca, Riga Technical University, LATVIA Ashok K. Mishra, Clemson University, USA Baris Binici, Middle East Technical University, TURKEY Coskun Bayrak, University of Arkansas, USA Demetrio Fuentes Ferrera, University of Castilla-La Mancha, SPAIN Fahrettin Ozturk, The Petroleum Institute, UAE Haci Murat Yilmaz, Aksaray University, TURKEY Heinz Ruther University of Cape Town, SOUTH AFRICA Homayoun Moghimi, Payame Noor University, IRAN Ihsan Ozkan, Konya Technical University, TURKEY John Trinder, The University of New South Wales, AUSTRALIA Kerim Kocak, Konya Technical University, TURKEY Loredana Judele, Technical University of Iasi, ROMANIA Mohamed Bouabaz, Université 20 août 1955-Skikda, ALGERIA Mohd Arif Wani, California State University, USA Mortaza Yari, University of Tabriz, IRAN Ömer Aydan, University of the Ryukyus, JAPAN Sanchoy K. Das, New Jersey Institute of Technology, USA Selim Dogan, Konya Technical University, TURKEY Spase Shumka, Agricultural University of Tirana, ALBANIA Tahira Geroeva, Baku State University, AZERBAIJAN Vladimir Androkhanov, Novosibirsk Soil Research Institute, RUSSIA

Ali Kocak, Yildiz Technical University, TURKEY Alpaslan Yarar, Konya Technical University, TURKEY Ataur Rahman, University of Western Sydney, AUSTRALIA Cihan Varol Sam Houston State University, USA Dan Stumbea, Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, ROMANIA Eva Burgetova, Czech Technical University, CZECH REPUBLIC Georgieva Lilia, Heriot-Watt University, UNITED KINGDOM Halil Kursad Ersoy, Konya Technical University, TURKEY Hi-Ryong Byun, Pukyong National University, SOUTH KOREA Huseyin Deveci, Konya Technical University, TURKEY Iraida Samofalova, Perm University, RUSSIA Juan Maria Menendez Aguado, University of de Oviedo, SPAIN Laramie Vance Potts, New Jersey Institute of Technology, USA Mila Koeva, University of Twente, NETHERLANDS Mohamed Metwaly Abu Anbar, Tanta University, EGYPT Moonis Ali Khan, King Saud University, KSA Murat Karakus, University of Adelaide, AUSTRALIA Saadettin Erhan Kesen, Konya Technical University, TURKEY Selcuk Kursat Isleyen, Gazi University, TURKEY Shukri Maxhuni, Prizen University, KOSOVA REPUBLIC Syed Tufail Hussain Sherazi, University of Sindh, PAKISTAN Thomas Niedoba, AGH University of Science and Technology, POLAND Zoran Sapuric, University American College Skopje, MACEDONIA

# KONYA MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ Konya Journal of Engineering Sciences (KONJES)

#### ISSN 2667-8055 (Elektronik)

Cilt	7	Eylül	2019	Sayı	3
Volume	7	September	2019	Number	3

#### İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

# Araştırma Makalesi (Research Article)

APPLYING AN OBJECT-BASED CLASSIFICATION APPROACH THROUGH A CELLULAR AUTOMATA-MARKOV METHOD IN LANDCOVER/LANDUSE CHANGE DETECTION PROCEDURE "CASE OF THE URMIA LAKE"

Urmiye Gölü Örneğinde Arazi/Arazi Değişimi Tespit Prosedüründe Hücresel Otomata Markov Yöntemi İle Nesne Tabanlı Sınıflandırma Yaklaşımının Uygulanması

Ramiz MAMMADOV, Ali Akbar RASULY, Hanieh MOBASHER, Keyvan MOHAMADZADEH (English) 536-550

. . . . .

METALİK MALZEMELERİN YÜKSEK HIZLARDAKİ EROZYON DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ

BİR HİDROLİK DERİN ÇEKME PRES MAKİNESİNİN PLC TABANLI BULANIK MANTIK KONTROLÜ VE ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMASI

PLC Based Fuzzy Logic Control Of A Hydraulic Deep Draw Press Machine

.....Ömer AYDOĞDU, Ahmet ÇATKAFA 573-584

**ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ FV SİSTEMDE MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİP ALGORİTMALARININ DEĞİŞKEN HAVA ŞARTLARI ALTINDA KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ** Comparative Analysis of Maximum Power Point Tracking Algorithms under Various Weather Conditions for Standalone PV System

......Fuad ALHAJ OMAR, Göksel GÖKKUŞ, Ahmet Afşin KULAKSIZ 585-594

# KALİKSAREN TÜREVİ İMMOBİLİZE EDİLMİŞ MERRIFIELD REÇİNESİ İLE KAPLI QCM SENSÖRÜNDE SULU ORTAMDA p-NİTROFENOL ALGILANMASI

Sensing of p-Nitrophenol in Aqueous Media on QCM Sensor Coated with Calixarene Derivative Immobilized Merrifield Resin

.....Egemen ÖZÇELİK, Farabi TEMEL, Mustafa TABAKCI 595-603

# ÖSTEMPERLEME SICAKLIK VE SÜRESİNİN ÖSTEMPERLENMİŞ SÜNEK DÖKME DEMİRLERİN MİKRO YAPI VE SERTLİĞİNE ETKİSİ

Effect of Austempering Temperature And Time on Microstructure and Hardness of Austempered Ductile Cast Irons (ADI)

.....Emre ÖZTÜRK, Mehmet YILDIRIM 604-611

# BETONARME KOLONLARIN SARGISIZ ve SARGILI BETON DAYANIMININ ANALİTİK Olarak Araştırılması

Analytical Investigation of Confined and Unconfined Concrete Strength of Reinforced Concrete Columns

.....S. Bahadır YÜKSEL, Saeid FOROUGHİ 612-631

# PRODUCTION AND STRUCTURAL ANALYSIS OF T<sub>i3</sub>AlC<sub>2</sub>/T<sub>i3</sub>C<sub>2</sub> INCORPORATED EPOXY COMPOSITES

Ti<sub>3</sub>A<sub>1</sub>C<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> Katkılanmış Epoksi Kompozitlerinin Üretimi

.....Derya KAPUSUZ (English) 632-644

# HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENEN ÇİNKO STANAT (Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub>) NANOPARÇACIKLARIN FOTOKATALİTİK PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Investigation of Photocatalitic Performance of Zinc Stanate (Zn2SnO4) Nanoparticles Synthesized by Hydrotermal Method

Elif BAYLAN, Ayşe CULU, Mehmet YILDIRIM, Teoman ÖZTÜRK, Savaş SÖNMEZOGLU, Özlem ALTINTAS YILDIRIM 645-653

AZ91 Mg ALAŞIMLARINDA KOROZYON DAVRANIŞI-Fe TOLERANS SINIRI ARASINDAKİ İLİŞKİNİN ARAŞTIRILMASI

EXPERIMENTAL STUDIES ON 1/5 SCALED REINFORCED CONCRETE FRAMES BY USING DIFFERENT STRENGTHENED METHODS

1/5 Ölçekli Betonarme Çerçevelere Farklı Güçlendirme Metotları Uygulanması Üzerine Deneysel Çalışmalar

......Fatih Süleyman BALIK, Fatih BAHADIR (English) 663-680

# APPLYING AN OBJECT-BASED CLASSIFICATION APPROACH THROUGH A CELLULAR AUTOMATA-MARKOV METHOD IN LANDCOVER/LANDUSE CHANGE DETECTION PROCEDURE "CASE OF THE URMIA LAKE"

# <sup>1</sup>Ramiz MAMMADOV, <sup>2</sup>Ali Akbar RASULY, <sup>3</sup>Hanieh MOBASHER, <sup>4</sup>Keyvan MOHAMADZADEH

<sup>1</sup>The Institute of Geography, National Academy of Sciences, University of Baku AZERBAIJAN <sup>2</sup>Department of Environmental Sciences, Macquarie University, Sydney, AUSTRALIA <sup>3</sup>University of Tabriz, Department of RS & GIS, Tabriz, Azerbaijan, IRAN

<sup>1</sup>ramiz.mamedov@geo.ab.az, <sup>2</sup>aliakbar.rasulypirouzian@mq.edu.au <sup>3</sup>hanieh.mobasher@yahoo.com, <sup>4</sup>km\_rs1990@yahoo.com

# (Geliş/Received: 08.11.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 06.12.2018)

**ABSTRACT:** The main aim of the present research was to reveal changes on Land-Cover/Land-Use Changes (LC/LUC) patterns in the in the northern coast of the Urmia Lake by applying an object-based image analysis (OBIA) process. Accordingly, in the image process procedures stage, spatial changes on the Urmia Lake surfaces were carefully acquired from the Landsat imageries, since 1987 to 2016. Then, in the second stage, LC/LU change patterns have been precisely delineated, for the southern hillsides of the Misho Mountain. The resulting models showed an overall accuracy of nearly about 92.54% and a Kappa coefficient of 91% in the image classification procedures. In the final stage, by introducing a Cellular Automata-Markov (CA-Markov) method and setting a transition matrix, the spatial changes on the LC/LU patterns have been progressively simulated for the approaching years till year 2020 inside the study area.

The final models illustrate a meaningful significant decrease in the Urmia Lake surface, accompanying by certain water volumes diminishing tendency, highlighting the fact that the amount of salty lands are meaningfully increasing. This harmful inclination has successively causes a critical diminishing on the vegetation's types by emerging the most recent changes on LC/LU types accompanying by a critical hyper-saline condition mainly around the coastal parts of the Urmia Lake.

Implementations of the current significant changes strongly pointing up that the majority of local biotic and abiotic components are in imitate dangers with serious environmental negative observations. Such rapidly occurring revolutionized changes on LC/LU will impose various critical effects on the existing in danger ecosystems and vulnerable climatic sub-systems in immediate prospect.

Key Words: Landuse Changes, Object-Based Approach and CA-Markov Method, Urmia Lake

# Urmiye Gölü Örneğinde Arazi/Arazi Değişimi Tespit Prosedüründe Hücresel Otomata Markov Yöntemi İle Nesne Tabanlı Sınıflandırma Yaklaşımının Uygulanması

**ÖZ**: Mevcut araştırmanın temel amacı, nesne tabanlı bir görüntü analizi (OBIA) işlemi uygulayarak Urmiye Gölü'nün kuzey kıyılarındaki Arazi Örtüsü / Arazi Kullanım Değişiklikleri (LC / LUC) modellerinde değişiklikleri ortaya koymaktı. Buna bağlı olarak, görüntü işleme prosedürleri aşamasında, Urmiye Gölü yüzeylerindeki uzamsal değişiklikler, 1987'den 2016'ya kadar Landsat görüntülerinden dikkatlice alınmıştır. Ardından, ikinci aşamada, Misho Dağı'nın güney yamaçları için LC / LU değişim modelleri kesin olarak tanımlandı. Elde edilen modeller, görüntü sınıflandırma prosedürlerinde yaklaşık% 92,54 genel bir hassasiyet ve% 91'lik bir Kappa katsayısı gösterdi. Son aşamada, Hücresel Otomata-Markov (CA-Markov) yönteminin tanıtılması ve bir geçiş matrisinin ayarlanmasıyla, LC / LU modellerinde uzamsal değişiklikler, çalışma alanı içinde 2020 yılına kadar yaklaşan yıllar boyunca aşamalı olarak simüle edilmiştir.

Nihai modeller, Urmia Gölü yüzeyinde, belirli su hacimlerinin eşlik ettiği ve azalan eğilimde anlamlı bir düşüş olduğunu göstermektedir, bu da tuzlu toprakların miktarının anlamlı şekilde arttığını vurgulamaktadır. Bu zararlı eğim, esas olarak Urmiye Gölü'nün kıyı bölgelerinde, kritik bir hiper-salin durumunun eşlik ettiği LC / LU tiplerinde en son değişikliklerin ortaya çıkmasıyla bitki örtüsünün tiplerinde kritik bir azalmaya neden olur. Mevcut önemli değişikliklerin uygulanması, yerel biyotik ve abiyotik bileşenlerin çoğunun ciddi çevresel olumsuz gözlemlerle taklit tehlikeler içinde olduğuna işaret etmektedir. LC / LU'ta bu tür hızlı bir şekilde meydana gelen devrim niteliğindeki değişiklikler, acil durumdaki tehlike ekosistemlerinde ve hassas iklimsel alt sistemlerde var olan çeşitli kritik etkiler yaratacaktır.

Anahtar kelimeler: Arazi Kullanım Değişiklikleri, Nesneye Dayalı Yaklaşım ve CA-Markov Yöntemi, Urmiye Gölü

#### INTRODUCTION

Land is one of the essential natural resources (Rahman et al., 2012). The unprecedented rate of land change has become a major concern around the world that's why this issue has affected the environmental services and biodiversity at the global level. Both anthropogenic and natural forces are responsible for these changes in Earth's surface. Anthropogenic forces such as urban expansion and the destruction of forests and meadows for economic purposes (development of agricultural land); and natural forces such as fire, flood and tsunami; have changed the type of land cover/use (LC/LU) all over the world (Keshtkar and Voigt, 2016). Monitoring and assessing LC/LU information is one of the most essential for managing natural resources and a variety of planning.

In recent decades, research has shown considerable progress towards assessing LUCC. Remote sensing technology is one of the suitable technologies for monitoring environmental and land cover/use changes, which has multi temporal, resolution and spectral capabilities (Rasuly et al., 2009). Landsat spectral data, which are free on the United States Geological Survey (USGS) website for downloading, have a remarkable temporal range of over 40 years and have great potential for LC/LU classification, change detection, and relevant analysis (Roy et al., 2014). A new classification method, object-based image analysis (OBIA), referred to as edge-detection, feature extraction, feature analysis or object-based remote sensing, appears to used best on satellite imagery (Blaschke, 2010). This form of feature extraction lets to use of additional variables such as shape, texture, and contextual relationships to classify image features.

In addition, geographic information systems (GIS) and remote sensing tools enable researchers to predict future LC/LU changes (Keshtkar and Voigt, 2016). In this research, we applied a cellular automata–Markov chain model (CA–Markov) to simulate future LC/LU changes. Both CA and the Markov chain model have great advantages in the study on LULC changes. The Markov model can quantitatively predict the dynamic changes of landscape patterns, but it is difficult to predict the spatial pattern of land use changes. In contrast the CA model with strong spatial computing can be used to simulate the spatial variation of the system effectively (Kamusoko et al., 2009).

The objectives of this study are (1) Object-based classification Landsat imageries, which were converted into TOA reflectance; (2) Analyzing LC/LU changes from 1987 to 2016; (3) Predict future LC/LU change in 2020 based on CA-Markov model. The Markov-CA model contributes to the understanding of LC/LU change in the northern coast of the Urmia Lake, which facilitates future planning.

#### MATERIALS AND METHODS

#### **Study Area and Materials**

The study area is located between 38° 0′ 32″ and 38° 25′ 28″ latitude and between 44° 57′ 23″ and 46° 01′ 14″ longitude in north-west of Iran (the Southern hillsides of the Misho Mountain and the northern coast of the Urmia Lake. The total area covers about 2951 km2 (Figure 1). The elevation of the study area varies from approximately 3100 m to 1270 m above mean sea level.



Figure 1. Study area - location of Urmia Lake in the Northwest of Iran and Middle East

Misho Mountain is one of the most important animal husbandry and agricultural center in the East Azerbaijan province which separate Marand plain from Shabestar plain and Urmia Lake. Also, the Urmia Lake is as a second largest salty lake in the world. The Urmia Lake is located in the north-west of Iran; as a second largest salty lake in the world. The last decade droughts based on climate change episodes, water consumption in agricultural fields, artificial coastal changes (roads building operations) and importantly dam construction programs have simultaneously caused more evaporation of the lake water and thus considerable variations of water surface levels. Average salinity of the lake ranges between 220- 300 mg/lit depending upon temporal and spatial conditions. It is worth to identify that Urmia Lake is the 20th largest lake and the second hyper-saline lake in the world and its basin is covered about 3.15 percent of the whole country (Rasouli et al., 2016).

#### Data Analyzed

Landsat imageries with a 30 m spatial resolution (path/row 169/33) were the main data for this study. The earliest one was Landsat Thematic Mapper (TM) taken on June 1987. The images were obtained from United States Geological Survey (USGS) site. Based on accessible time intervals and the image quality, other Landsat (ETM+ and OLI) images were provided and have been taken on different image processing

No.	Dataset Type	Acquisition Date	Sensor Name
1	Landsat 5	June 1987	ТМ
2	Landsat 5	July 1989	ТМ
3	Landsat 5	July 1995	TM
4	Landsat 5	June 2000	TM
5	Landsat 7	July 2002	ETM+
6	Landsat 5	July 2006	TM
7	Landsat 5	July 2010	TM
8	Landsat 8	July 2014	OLI
9	Landsat 8	June 2015	OLI
10	Landsat 8	July 2016	OLI
11	Aster		Terra

procedures respectively. A 30 m Digital Elevation Model (DEM), based on Aster imagery, was also employed. Table 1 indicates all datasets which have been processed in current study. Table 1. Dataset summary

#### **Methods Applied**

The image processing was performed in four stages including pre-processing, object oriented classification, post processing and predicting a LULC for 2020.

#### Data pre-processing

In the pre-processing stage radiometric correction and atmospheric correction are prerequisite for generating high-quality scientific data (Chander et al., 2009), making it possible to discriminate between product artefacts and real changes in Earth processes (Justice et al., 2002) as well as accurately produce LULC maps and detect changes (Song et al., 2001). The radiometric conversion for The Landsat TM and ETM+ was performed in the software of Environment for Visualizing Images (ENVI, Version 5.3) by following the Equations (1) and (2), where the spectral radiance ( $L_{\lambda}$ ) and the TOA reflectance ( $\rho_{\lambda}$ ) were obtained:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{max} - L_{min}}{Q_{cal_{max}} - Q_{cal_{min}}}\right) \times (Q_{cal} - Q_{cal_{min}}) + L_{min}$$
(1)

$$\rho_{\lambda} = \frac{n \times L_{\lambda} \times u}{ESUN_{\lambda} \times \cos \theta_{S}} \tag{2}$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(DOY \frac{2\pi}{365}\right) \tag{3}$$

where:

 $L_{max}$  = the spectral radiance scales to  $Q_{cal_{max}}$ 

- $L_{min}$  = the spectral radiance scales to  $Q_{cal_{min}}$
- **Q**<sub>calmax</sub> = the maximum quantized calibrated pixel value

*Q*<sub>calmin</sub> = the minimum quantized calibrated pixel value

 $Q_{cal} = DN$ 

*d* = the distance from the earth to the sun

DOY = Day of year

**ESUN** $_{\lambda}$ =mean solar exo-atmospheric irradiance

 $\theta_{S}$  = Solar zenith angle

In the case of the data from the Landsat 8, the radiometric conversion was performed by applying the equations (4) and (5):  $\rho'_{\lambda} = M_0 \times Q_{cal} + A_n$ (4)

$$\rho'_{\lambda} = M_{\rho} \times Q_{cal} + A_{p}$$

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda}}{\sin \theta_{SE}} \tag{5}$$

where:

 $M_{\rho}$ = Band-specific multiplicative rescaling factor

 $A_p$  =Band-specific additive rescaling factor

 $\rho'_{\lambda}$ = TOA planetary reflectance, with correction for solar angle

 $\theta_{SE}$  = the local sun elevation angle.

ENVI has a quick atmospheric correction module for retrieving spectral reflectance. This method can be very time-consuming; hence to reduce the time of image processing all data were subset with a vector file of study area.

#### Image processing

At the processing stage, we used object-based classification method based on a set of spectral, texture and contextual indicators. In general, this method aiming to relate geographic features with image objects can be divided into two main parts, namely segmentation and classification (Liu et al., 2008). This method uses geographic objects as basic units for LULC classification. We used eCognition Developer 9.0 to classification each date of imagery. The eCognition software provides a systematic approach and userfriendly interface that permits implementation of concepts developed in the past (Campbell and Wynne, 2011). Based on different standards such as quality of segmentation without considering classification accuracy, they found that eCognition segmentation was better than the alternatives, including ERDAS Imagine, for a variety of reasons including having different segmentation algorithms and classifiers (Meinel and Neubert, 2004). In software setting, the image classification is based on attributes of image objects rather than on the attributes of individual pixels. Therefore, Object-oriented classifier found to deliver results noticeably better than conventional methods. It leads to better semantic differentiation and higher classification accuracy (Rasouli et al., 2016). The quality of classification is directly affected by segmentation quality. Image segmentation means the partitioning of an image into meaningful regions based on homogeneity or heterogeneity criteria, respectively (Neubert et al., 2006). This research used a multi-resolution segmentation approach, a bottom- up homogenous region aggregation technique based on certain criteria (e.g., scale, shape, and compactness criteria). The scale parameter determines the size of objects (Benz et al., 2004). All non-thermal bands of the Landsat images (six bands) and DEM were used for image segmentation. The appropriate segmentation scale and the parameters associated are indicated in Table 2.

Table 2. Multi-resolution segmentation parameters

Scale	Shape	Compactness	Band Weights
25	0.2	0.5	ue (1), Green (1), Red (1), NIR (1), SWIR1 (1), SWIR2 (1), DEM (1)

At the classification stage we used the assign class algorithm to classify the image objects into 7 classes that Urmia Lake, salty area and agricultural area were our three main LULC by equations 6, 7, 8, 9, 10 and 11).

$$NDVI \ 1 = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \tag{6}$$

 $NDWI \ 2 = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \tag{7}$ 

$$SI9\ 3 = \frac{Blue * Red}{Green} \tag{8}$$

$$SI10 \ 4 = \frac{Blue}{Red} \tag{9}$$

$$NDSI \ 5 = \frac{Red - NIR}{Red + NIR} \tag{10}$$

$$BSI 6 = \frac{(SWIR1 + Red) - (NIR + Blue)}{(SWIR1 + Red) + (NIR + Blue)}$$
(11)

A classification is not complete until its accuracy is assessed (Lillesand et al., 2014). Accuracy assessment of classification maps was achieved using a random sampling method. After land-cover classification, a minimum of about 50 sample points were randomly selected for the evaluation of classification accuracy for six land-cover classes. Accuracy assessment was based on the calculation of the overall accuracy and kappa coefficient.

#### LC/LU change analysis

Post-classification analysis allows us to know the quantity, location and nature of LULC changes by comparing two classified maps; in such a way, a "from- to" matrix of changes was generated Sanchez-Reyes et al. (2017) using the Cross tabulation module of IDRISI Selva 17.0. The ten images classified by object oriented were pairwise compared to detect patterns of change between 1987–1989, 1989–1995, 1995–2000, 2000–2002, 2002- 2006, 2006- 2010, 2010- 2014, 2014-2015 and 2015-2016.

#### Markov Chain analysis

This kind of predictive LULC change modeling is appropriate when the past trend of LULC changing pattern is known (Eastman, 2009). A Markov chain is a stochastic process (based on probabilities) with discrete state space and discrete or continuous parameter space (Balzter, 2000). In this random process, the state of a system s at time (t+1) depends only on the state of the system at time t, not on the previous states. The Markov model not only explains the quantification of conversion states between the LULC types, but can also reveal the transfer rate among different LULC types. It is commonly used in the prediction of geographical characteristics with no after-effect event which has now become an important predicting method in geographic research (Li et al., 2015). Based on the conditional probability formula, the prediction of LULC changes is calculated by the equation 12:

$$S_{(t+1)} = P_{(ij)} \times S_{(t)}$$
 (12)

Where  $S_{(t)}$ ,  $S_{(t+1)}$  is the system status at the time of (t) or (t + 1);  $P_{(ij)}$  is the transition probability matrix

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Normalized Difference Vegetation Index

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Normalized Difference Water Index

<sup>3</sup> Salinity Index 9

<sup>4</sup> Salinity Index 10

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Normalized Difference Salt Index

<sup>6</sup> Bare Soil Index

in a state which is calculated by equations 13 and 14 (Xiyong et al., 2004):

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix}$$
(13)

 $(0 \le P_{ij} \le 1 \text{ and } \sum_{j=1}^{N} P_{ij} = 1, (i, j = 1, 2, 3, ..., n))$  (14)

According to the matrix of the initial  $S_{(0)}$  and the transition probability of the nth stage  $P_{(n)}$ , the LULC distribution in the northern coast of the Urmia Lake in the future can be calculated by using a computer simulation. The Markov simulation model  $S_{(0)}$  is calculated by equation 15:

 $S_{(n)} = S_{(n-1)} \times P^{(1)} = S_{(0)} \times P^{(n)}$ (15)

## Multi Criteria Evaluation (MCE)

Multi-Criteria Evaluation process (MCE) involves criteria of varying importance in accordance to decision makers and information about the relative importance of the criteria (Behera et al., 2012). Factors used in MCE account for suitability, accessibility, and neighbourhood effects. This suitability maps determine which pixels will change as per the highest suitability of each LULC type.

#### CA model

Cellular Automata is a simulation model where the space and time are discrete variables and interactions assigned are local variables. In a CA model, the transition of a cell from one land-cover to another depends on the state of the neighbourhood cells. This is based on the idea that a cell will have a higher probability to change to land-cover class 'A' than to a land-cover class 'B' if the cell is in closer proximity to land-cover class 'A'. Thus the CA model not only uses the information of the previous state of a land-cover as done by a Markov model but also uses the state of neighbourhood cells for its transition rules (Adhikari and Southworth, 2012).

#### Markov - CA model

The Markov model can quantitatively predict the dynamic changes of landscape pattern, while it is not good at dealing with the spatial pattern of landscape change. On the other hand, Cellular Automata (CA) has the ability to predict any transition among any number of categories (Pontius & Malanson, 2005). Combining the advantages of Cellular Automata theory and the space layout forecast of Markov theory, CA-Markov model performs better in modelling LULC change in both time and spatial dimension. At present, IDRISI software is one of the best platforms to conduct CA-Markov model, which is developed by Clark Labs in the U.S.

In this study we used the CA–Markov model to simulate LULC. Three datasets, (1) LULC base map in 2010, (2), the 2010 land suitability maps which created by using MCE (Multi-Criteria Evaluation) model and (3), transition probability matrix from 2006 to 2010 are integrated using CA neighbourhood to simulate land use map in 2016. The standard 5×5 contiguity filter is used as the neighbourhood definition in this study. That is, each cellular center is surrounded by a matrix space which is composed by 5×5 cellular to impact the cellular changes significantly. The filter used analysis is based on:

0	0	1	0	0
0	1	1	1	0
1	1	1	1	1
0	1	1	1	0
0	0	1	0	0

Figure 2. Filter configuration used in CA Markov

#### Model validation

In order to ensure that the model is reliable in predicting an LC/LU for a specific project year, it must be validated using existing datasets (Hadi et al., 2014). Now the aim is to select the most appropriate model. The traditional way of validating a model or comparing two maps, using Kappa statistics, is now out-of-date (Ahmed and Ahmed, 2012). A method of comparing three maps (a reference map of time 1, a reference map of time 2 and a simulation map of time 2) has been implemented for model validation (Pontius et al., 2011). The confirm module in IDRISI Selva was used for validating the model by producing After converting Landsat radiance values to reflectance and eliminating the negative effects of molecular scattering and aerosols the quality of the image was improved. As we have mentioned we applied an object- oriented image analysis of eCognition software for the classification LC/LU on Landsat images between 1987 and 2016. Object-oriented image analysis requires the several parameters: K-standard, Klocation, and K-no which are used to identify the accuracy of the model. The predictive power of the model is considered strong when around 80% accuracy is achieved (Eastman, 2009). At the end, following the same process, the LC/LU for the year 2020 was projected with the CA–Markov model using the transition probabilities from 2010 to 2016 and the LC/LU base map from the year 2016.

#### RESULTS

#### **Converting Landsat Radiance Values to Reflectance**

After converting Landsat radiance values to reflectance and eliminating the negative effects of molecular scattering and aerosols the quality of the image was improved.

#### Land use/cover classification

As we have mentioned we applied an object-oriented image analysis of eCognition software for the classification LULC on Landsat images between 1987 and 2016. Object-oriented image analysis requires the creation of objects or separated regions in an image. After conducting the Multi Resolution Segmentation process, we developed the rule sets for classifying each test area. Then, the threshold values were obtained (Table 3). Figure (3) indicates the LC/LU map of the study area. The results from the classification were shown in Table 4, indicating the total area and percentages of LC/LU classes.

Lable 3. Threshold values for each rule						
LC/LU Classes	Threshold Conditions					
Urmia Lake	NDWI > -0.138 NDSI > -0.096					
New Salt	SI9 > 750 BSI < 0.17					
Salted Soil	SI10 > 0.48					
Salty barren lands	NDS <i>I</i> > -0.32 Br <i>igh</i> tness > 2700					
Vegetation (Agricultural and Garden Lands)	NDVI > 0.35 Mean DEM ≤ 1735					
Dams and Agricultural ponds	NDWI > -0.138 Mean DEM < 1300					



Figure 3. LC/LU classification maps

Year											
LC/LU		1987	1989	1995	2000	2002	2006	2010	2014	2015	2016
Dams and	Area	0.0044	0.028	0.081	0.104	0.094	0.112	0.186	0.25	0.418	0.332
Agricultural ponds	percentages	0.001	0.001	0.003	0.04	0.003	0.004	0.006	0.008	0.014	0.011
	Area	742.954	761.564	813.567	721.976	670.681	642.403	515.919	290.438	306.442	378.678
Urmia Lake	percentages	25.182	25.81	27.58	24.47	22.73	21.77	17.49	9.84	10.39	12.83
Agricultural	Area	251.813	169.811	239.697	233.447	212.806	197.134	157.08	190.877	209.867	172.872
Area	percentages	8.535	5.76	8.12	7.91	7.21	6.68	5.32	6.47	7.11	5.86
	Area	19.147	8.609	5.1589	10.915	20.54	31.641	56.498	144.374	133.658	117.779
New Salt	percentages	0.649	0.29	0.17	0.37	0.7	1.07	1.91	4.89	4.53	3.99
	Area	19.088	26.941	3.593	58.754	110.003	129.647	165.063	303.208	298.631	240.158
Salted Soil	percentages	0.647	0.91	0.12	1.99	3.73	4.39	5.59	10.28	10.12	8.14
Salty Barren	Area	291.816	227.635	230.895	279.207	216.221	254.975	331.64	283.545	300.067	332.906
Lands	percentages	9.891	7.72	7.83	9.46	7.33	8.64	11.24	9.61	10.17	11.28
	Area	1625.497	1755.772	1657.376	1645.957	1720.016	1694.447	1723.97	1737.666	1701.275	1707.634
Other Lands	percentages	55.095	59.51	56.18	55.79	58.3	57.43	58.43	58.9	57.66	57.88
Total	Area	2950.4	2950.4	2950.4	2950.4	2950.4	2950.4	2950.4	2950.4	2950.4	2950.4

Table 4. Area and percentage of LC/LU classes

The accuracy of the classified image was then assessed by using randomly selected around 50 points. Table 5 informs the results of the overall accuracy and kappa. This accuracy assessment shows that the classification is stable.

Table 5. The classification accuracy values and Kappa coefficie									
		Kappa	Overall Accuracy %						
	1987	0.89	90.2						
	1989	0.86	89.5						
	1995	0.90	93.7						
	2000	0.90	92.4						
	2002	0.91	91.7						
	2006	0.90	92.1						
	2010	0.92	93.6						
	2014	0.93	93.7						
	2015	0.91	93.1						
	2016	0.91	92.4						

ents

#### LULC Changes (Directions and Trends of the Urmia Lake Growth Model)

The overall classification accuracy for the extracted LC/LU maps in Table 3 indicate the suitability of the classified remote sensing images for effective LC/LU change analysis. A cross tabulation process was applied to identify the major changes between two LC/LU maps of the specified time periods. Trend of LC/LU change maps in each class from the nine periods are displayed in Figure 4.



Figure 4. LC/LU changes (km2)

There was a lot of fluctuation in the amounts of LC/LU changes. Spatial analysis of the LC/LU changes illustrates evidently that the conversions between Urmia Lake and salt was the most distinctive change of the study period. According to the graph, from 1987 to 2016, there was sharp fall in the Urmia Lake surfaces and a gradual decrease in agricultural lands. However, there is a slight increase in salty lands.

#### **CA-Markov Model**

#### **Transition Matrix**

Other Lands

0.0001

0

The LC/LU was projected using Markov's transition probability matrix (Tables 6 and 7) to show how each land type was projected to change. The diagonal of the transition probability represents the selfreplacement probabilities, that is, the probability of a salt cover class remaining the same, whereas the offdiagonal values indicate the probability of a change occurring from one salt cover class to another. The LC/LU map in 2006 and 2010 were operated by the Markov chain model in order to identify the probability of changing and transition areas.

Such probability transition values were applied to predict the LC/LU for the year 2016 with a

_Markov model.							
Table	6. Transition pro	bability matr	ix, calculated bas	ed on LC/LU	maps of 200	06-2010	
LC/LU	Dams and Agricultural ponds	Urmia Lake	Agricultural Area	New Salt	Salted Soil	Salty Barren Lands	Other Lands
Dams and Agricultural ponds	0.579	0	0.0013	0	0	0.0022	0.4175
Urmia Lake	0	0.7177	0	0.079	0.1978	0.0041	0.0014
Agricultural Area	0	0	0.5558	0	0.0001	0.0027	0.4415
New Salt	0	0.0017	0.0006	0.0004	0.6603	0.3151	0.0218
Salted Soil	0	0.0005	0.0014	0.0001	0.3307	0.5870	0.0803
Salty Barren Lands	0	0	0.0005	0	0.0015	0.8783	0.1197

0.0186

0.0325

0.0004

0

0.9484

Mar CA

Table 7. Transition probability matrix, calculated based on EC/EO maps of 2010-2016							
LC/LU	Dams and Agricultural ponds	Urmia Lake	Agricultural Area	New Salt	Salted Soil	Salty Barren Lands	Other Lands
Dams and Agricultural ponds	0.7844	0	0	0	0	0.0701	0.1455
Urmia Lake	0	0.8104	0	0.1888	0	0.0007	0.0001
Agricultural Area	0	0	0.8492	0	0	0	0.1507
New Salt	0	0.0002	0	0.1771	0.8227	0	0
Salted Soil	0	0.0005	0	0.0154	0.9621	0.0207	0.0013
Salty Barren Lands	0	0	0	0	0.0085	0.9419	0.0495
Other Lands	0.0001	0	0.0203	0	0.0003	0.0096	0.9698

Table 7. Transition probability matrix, calculated based on LC/LU maps of 2010-2016

#### **Model Validation**

For the model validation, we compared the simulated map of 2016 with the actual LC/LU map. The K-standard, K- no, and K-location indicators resulted in measures of 89.4%, 91.26% and 94.02%, respectively. Visual comparison also shows great similarity between the actual and simulated maps for the year 2016 (Figure 5).

The Kappa statistics value indicates that the CA–Markov model was effective in simulating LC/LU change in 2016. Therefore, the Markov–CA model can be used to predicting the spatial distribution of LC/LU in the future with the assumption that an unvarying rate of change will occur in the future.



Figure 5. LC/LU map for year 2016: (a) actual map (b), simulated map

#### Prediction of LC/LU changes for 2020

By assuming of persistence of speed of LC/LU changes like past years (i.e. 2010-2016), the future

LC/LU map for the year 2020 were predicted (Figure 6). A Comparison of LC/LU maps for 2016 and 2020 shows that the extent of Urmia Lake in our study area and new salt will decrease from 378.7 km<sup>2</sup> to 307.023 km<sup>2</sup> and from 117.779 km<sup>2</sup> to 96.0596 km<sup>2</sup>, respectively. As well the results show the salted soil, salty barren lands and agricultural areas will increase by 331.227 km<sup>2</sup>, 335.246 Km2 and 181.426 km<sup>2</sup>, respectively.



Figure 6. Predicted LC/LU map for year 2020

#### **CONCLUDING REMARKS**

The assessment of LC/LU changes and predicting future are crucial information for planners and organizations to allocate important infrastructures and land management in response to the diverse requirements of the people in this region. In this context, to accommodate this need, satellite images, objects-based classification and a combination of Markov chain analysis and CA were used.

The main advantage of OBIA is that it represents the classification units as real world objects on the ground, thereby reduces the within class variability. In addition, the CA–Markov land use simulation model has an important contribution to land use modeling.

In the present study, we were able to depict the relationship among LC/LU types in different time periods. A change survey of the study area revealed that water surface and the amount of salty lands are changing sharply. Thus it is urgent to strengthen the protection of arable land and water and prevent acts of indiscriminate use of cultivated land in order to promote land protection and rational use of land.

Reducing the surface of Lake Urmia and, as a result, increasing the salty lands around the lake, as well as reducing the agricultural area in the Misho Mountain, has increased the use of inhabitants from underground water, which is a reason to reduce the input water into the lake. Hence, by modifying the irrigation methods or choosing corps that have little water requirement, it is possible to improve the lake situation and increase its level.

Some recommendations are provided. First, Landsat data is not mandatory, any other type of image can be useful, and a higher resolution such as Spot imageries will greatly improve the results obtained. Second, it is suggested that data belong to similar dates in order to avoid seasonality, since an erroneous LC/LU classification could affect the succession analysis.

# **REFERENCES:**

Adhikari, S., Southworth, J. Simulating forest cover changes of Bannerghatta National Park based on a CA-Markov model: a remote sensing approach. Remote Sensing, 2012 4(10), 3215-3243.

Ahmed, B., Ahmed, R. Modeling urban land cover growth dynamics using multi- temporal satellite images: a case study of Dhaka, Bangladesh. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2012. 1 (1), 3-31.

Balzter, H., Markov chain models for vegetation dynamics. Ecological Modelling, 2000.126 (2-3), 139-154. Behera, D. M., Borate, S. N., Panda, S. N., Behera, P. R., Roy, P. S. Modelling and analyzing the watershed dynamics using Cellular Automata (CA)–Markov model–A geo-information based approach. Journal of earth system science, 2012. 121 (4), 1011-1024.

Benz, U. C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I., Heynen, M. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004,58 (3-4), 239-258.

Blaschke, T. Object based image analysis for remote sensing. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010. 65 (1), 2-16.

Campbell, J. B., Wynne, R. H. Introduction to remote sensing (Vol. 5): Guilford Press: New York, NY, USA. 2011.

Chander, G., Markham, B. L., Helder, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote sensing of environment, 2009. 113 (5), 893-903.

Eastman, J. R. IDRISI Taiga guide to GIS and image processing. Clark Labs Clark University, Worcester, MA. 2009.

Hadi, S. J., Shafri, H. Z., Mahir, M. D. Modelling LULC for the period 2010-2030 using GIS and Remote sensing: a case study of Tikrit, Iraq. Paper presented at the IOP conference series: earth and environmental science. 2014.

Justice, C., Townshend, J., Vermote, E., Masuoka, E., Wolfe, R., Saleous, N., Morisette, J. An overview of MODIS Land data processing and product status. Remote sensing of environment, 2002. 83 (1-2), 3-15. Kamusoko, C., Aniya, M., Adi, B., Manjoro, M. Rural sustainability under threat in Zimbabwe–simulation of future land use/cover changes in the Bindura district based on the Markov-cellular automata model. Applied Geography, 2009,29 (3), 435-447.

Keshtkar, H., Voigt, W. A spatiotemporal analysis of landscape change using an integrated Markov chain and cellular automata models. Modeling Earth Systems and Environment, 2016. 2 (1), 10.

Li, S., Jin, B., Wei, X., Jiang, Y., Wang, J. Using CA-Markov model to model the spatiotemporal change of land use/cover in Fuxian Lake for decision support. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015. 2 (4), 163.

Lillesand, T., Kiefer, R. W., Chipman, J. (2014). Remote sensing and image interpretation: John Wiley & Sons.

Liu, Y., Guo, Q., Kelly, M. A framework of region-based spatial relations for non- overlapping features and its application in object based image analysis. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2008. 63 (4), 461-475.

Meinel, G., Neubert, M. A comparison of segmentation programs for high resolution remote sensing data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004. 35 (Part B), 1097-1105.

Neubert, M., Herold, H., Meinel, G. Evaluation of remote sensing image segmentation quality– further results and concepts. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2006.36 (4/C42).

Pontius, G. R., Malanson, J. Comparison of the structure and accuracy of two land change models. International Journal of Geographical Information Science, 2005. 19 (2), 243-265.

Pontius Jr, R. G., Peethambaram, S., Castella, J.-C. Comparison of three maps at multiple resolutions: a case study of land change simulation in Cho Don District, Vietnam. Annals of the Association of American Geographers, 2011. 101 (1), 45-62.

Rahman, A., Kumar, S., Fazal, S., Siddiqui, M. A. Assessment of land use/land cover change in the North-West District of Delhi using remote sensing and GIS techniques. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2012. 40 (4), 689-697.

Rasuly, A. A., Mahdian, M. Moharrami. M. and Derrafshi, A. Signifying of the Urmia Lake Landuse Changes By Object-Oriented Image Processing Techniques. 2016.

Rasuly, A. A. Principle of applied remote sensing: image processing: Press Office: University of Tabriz, Tabriz, Iran. 2009.

Roy, D. P., Wulder, M., Loveland, T. R., Woodcock, C., Allen, R., Anderson, M., Kennedy, R. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. Remote sensing of environment, 2014. 145, 154-172.

Sánchez-Reyes, U. J., Niño-Maldonado, S., Barrientos-Lozano, L., Treviño-Carreón, J. Assessment of land use-cover changes and successional stages of vegetation in the natural protected area Altas Cumbres, Northeastern Mexico, using Landsat satellite imagery. Remote Sensing, 2017. 9 (7), 712.

Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P., Macomber, S. A. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? Remote sensing of environment, 2001. 75 (2), 230-244.



# ADVANCED LIFE SUPPORT REQUIREMENTS FOR UNDERGROUND WORKPLACE ACCIDENTS

# Mehmet Kemal GÖKAY

Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Mining Engineering Department, Konya, TÜRKİYE mkgokay@ktun.edu.tr

# (Geliş/Received: 31.12.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 10.02.2019)

**ABSTRACT:** Mining sector is important business and industrial activity in some countries. When ore explorations are gradually turned into mine operations, more people will gradually be employed in the mining industry. Even with today's mining capacity, work and work place occupational safety are main concern for related workbodies. Minor scale mine accidents are not publically announced due to their individual characteristics. But some others happened in big scale which becomes national dilemma. After the event, each of them is followed by mine rescue operations, media broadcastings from the sites, families waiting for their relatives in indescribable hopes, angers, disappointing physiology. Rescue teams in these occasions have responsibilities to reach and safe the trapped/injured miners. The question arose here is what the level of "first-aid" or "life-support" training for some of the members of rescue teams should be. Some of the rescue team members should deal with excavations, ventilations, mine supports etc. but some of them should definitely deal with trapped, injured, collapsed workers without loosing their own life and physiologic wellness. In this study, importance and requirements of Advanced Life Support (ALS) services in mine accidents are evaluated according to experiences to have more realistic and valuable rescue operations.

Keywords: Mines, Mine accidents, First-aid, Advanced life support, Mine rescue.

# Yeraltındaki İşyeri Kazaları İçin İhtiyaç Duyulan İleri Seviye Hayat Destek Servisi

ÖZ: Madencilik birçok ülke ekonomisi için önemli bir iş ve sanayi koludur. Maden arama faaliyetleri sonuçlandıkça bu faaliyetlere bağlı olarak çalışmaya başlayan maden ocaklarında çalışan insanların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Bugünün çalışma şartlarında, gelişen teknolojiye rağmen, iş ve işyeri güvenliği maden ocakları için hala üzerinde dikkatle durulması gereken konular arasındadır. Bazı maden işyeri kazaları medya aracılığıyla herkese duyurulmasada, büyük çaplı maden ocağı kazaları ülke çapında üzüntüye neden olabilmektedir. Önemli maden kazaları sonucunda görmeye alıştığımız manzara ve olaylar; organize edilen kurtarma çabaları, medyanın yayınları, maden ocağı çevresinde umut, kızgınlık, hayal kırıklığı psikolojisi içinde bekleyen kazazede yakınları ve ülke genelinde duyulan üzüntü şeklinde sıralanabilir. Kurtarma ekiplerinin maden kazalarındaki sorumluluğu kaza yerine ulaşıp orada mahsur kalan ve/veya yaralanan kazazedeleri kurtarmaktır. Bu aşamada sorulması gereken sorulardan birisi; kurtarma ekibi içinde yeralacak görevlilerin hangi düzeyde "ilk yardım" ve/veya "hayat destek" sağlık bilgileriyle eğitilmeleri gerektiğidir. Maden ocaklarında kurtarma ekibi faaliyetleri sürerken, bazı ekip üyeleri, galeri kazısı, göçük kaldırma, havalandırma ve galeri tahkimatı işleriyle uğraşırken, bazı ekip üyeleri de kaza yerinde sıkışan, göçük altında kalan, yaralanan kazazedeleri kurtarma işleriyle uğraşacaklardır. Bu işlemleri yaparken kurtarma ekibi üyeleri kendi hayatlarını tehlikeye sokmamalı ve kendi psikolojik durumlarını bozmadan kurtarma işlemini sürdürebilmelidirler. Burada, maden kazaları ele alındığında, uzman doktorların kurtarma ekip üyesi olarak, kaza mahallinde verebileceği hayat destek servisinin önemi ve ihtiyaç durumu, maden kazalarında edinilen kurtarma deneyimlerine göre değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Madencilik, Maden kazaları, İlk yardım, İleri seviye hayat desteği, Maden kurtarma.

#### INTRODUCTION

Natural and engineered underground openings have their own conditions. Natural ones cover caves, cave systems, sinkholes, underground water passageways in macro scale, and discontinuity apertures in micro scales. Engineered underground openings on the other hand are underground mine facilities, road and rail tunnels, metro openings, machine chambers of energy plants, underground repositories, underground cities, underground spaces used for hotels, restaurants, cafes and sport&life activity centers etc.

Underground openings can be analyzed for their stability conditions in two main phases; excavation and usage phases. Excavation sometimes is the aim of the operation, like in mining. Excavated ores and coals are main product to get earnings. In other cases, openings obtained after excavations are the required targets to use as tunnels, storage volumes and living spaces. In both cases, occupational workforce employed for these openings either for their excavation or their usage should work in planned and safe workplaces. Underground mines, especially coal mines have very strict rules to maintain work and workplace safety (ILO, 1986; WVOMHST, 2008). These rules have been upgraded gradually after getting experiences through mine accidents. Other underground openings have also their own workplace safety procedures to follow (Hooker & Shalit, 2000). Coal mines probably have more seam gases which can be poisonous, suffocating or explosive. Other underground openings might have (or not) country rock related gases also. Therefore they have to be controlled to get safe workplaces with paying attention to their ventilation, water discharge and openings' stability.

Engineers worked for rock engineering studies and rock engineering design procedures have realized long before that (Bieniawski, 1992), risk originated by rock masses can not be totally eliminated. There are always some degrees of risk of accidents due to uncertainties of data obtained from rock formations (Stacey etal, 2007). Engineers know that without accepting the risk in mining and usage of other underground openings, nothing could be obtained from earth crust (Erdogan, 2016). Beside this handicap, engineers supply underground design options for different operations. Design engineers handled the uncertain data features by increasing engineering safety factors. Expecting concealed factors causing accidents is another fact originating basically through these natural uncertainties. Thus each underground openings might be affected by discharge of gases and water through the country rocks; deterioration of rock strengths; roof, floor and sidewall failures etc. Therefore employees in underground openings can be involved in an accident not related with human and machine related factors (Patterson, 2009), but also factors related with the mentioned parameters above (Hall&Snelling, 1907; Saleh&Cummings, 2011).

Mine design engineers have been educated in mining sectors to supply mine plans which end up with no or minimum casualties in case of mine accidents (Gokay&Shahriari, 2016, 2017). This target may possibly be obtained supplying alternative galleries, passageways and heavily supported chambers, emergency shelters, etc. (Fernando etal, 2007). These types of organized mines have also well trained rescue teams including first-aid members and physicians (Muezzinoglu, 2015). Therefore, underground openings design stage is starting point to get safer underground spaces for different businesses. Thus, different types of engineers should be employed in this stage to reach most applicable and most meaningful underground design options by good manner (direction) of cooperation. Thus, each company requires these design procedures after getting full brainstorming, factorizing, analyzing, evaluation, planning, checking and verification steps in their design duties. One of the questions which should firstly be thought, while performing underground design activities; (that is), how the employees can be rescued in different cases of underground workplace accidents? Mining law of each country has detail procedures to organize rescue teams in mines (HSE, 2001; USDL, 2008; NSW, 2010; Capstone, 2015; Lehnen, 2016; Catakci, 2016). Similar procedures should be followed for each engineered underground operations. Underground rescue duties can not professionally be handled by other teams which have not been trained for accidents occurred at underground openings.

#### UNDERGROUND OPENINGS AND RELATED RESCUE OPERATIONS

Accidents can be occurred in all workplaces including underground operations. Minor scale accidents which cover small localization together with very few employees can be handled professionally as the major scale underground disasters like coal mine explosions. Main aims are saving and securing the employees lifes first. Especially mining safety rules describe the procedure to be followed in any case of accidents. For each type of underground openings, (mines, tunnels, storage places, living places, hotels, cafes etc) there should be pre-described steps which employees have been trained to follow in case of accidents. In case of underground workplace accidents, followings are the main aims of emergency actions (NMA, 2015) described by National Mining Association, NMA, of USA; *i*)"Minimize the effect of emergencies on company personnel and on the surrounding communities, and on the public.", *ii*) "Minimize: *injury; damage to environment; property damage; damage to equipment; and losses to process that result from emergencies*". Employees who noticed underground accident should follow certain pre-described steps like given by NMA, (NMA, 2015);

"a) Notify the supervisor of the emergency situation. b) Report the emergency as described on the "Emergency response plan". c) Provide help until the appropriate response team(s) arrives. Never place yourself or others in danger, especially during fires, or chemical emergencies. d) If an alarm is sounded or you are instructed to do so, evacuate the area to designated assembly points and stay there until you are instructed to leave. e) If an evacuation takes place, follow the directions. Make sure you and any visitors you are responsible for are accounted for by your supervisor. f) If you are responsible to perform shutdown procedures, know your responsibilities and perform them accordingly. g) If responders are already at the scene of an emergency, do not go to the scene to watch or offer assistance unless you are personally called to the scene. "

As it is described here appropriate response team(s), accident rescue team(s), have important role to save injured workers and set the accident situation in order, as soon as possible. There are certain procedures to follow about "health of rescue team members and their experiences in underground activities" by regulations. It is obvious that these workers and engineers aiming to save injured workers and mine equipments and properties have enough skills, experiences, education and trainings (HSE, 1993; Conti etal, 1998; TTK, 2000; Mischo etal, 2014; NIOSH, 2015). Underground rescue operations include, entering underground facilities which had minor or severe scale accidents (or explosions) before. These action covers advancing through unsecure galleries and working places.

If the accident is related with methane or coal dust explosions, situation at underground disaster site (exploited galleries, working places etc) is most probably unreachable due to collapse of galleries. If the accidents in underground is just related with roof failure, working places are most probably filled by collapsed country rocks which should be cleared away to reach injured victims (employees). Other underground accident types have their own especial cases (water in flushes, underground mine fires, etc) which rescue teams had been trained accordingly to deal with the problems they might come across during rescue operations. Rescue team has always a leader, experienced person to handle situations in harsh underground environments. The other members of the team should be ready (healthy, fit enough and trained) to perform any required excavations, (drill, blast, load & carry jobs to clear away the debris and country rocks) to advance toward the accident victims in underground. Distances from the mine entrance to accident locations are generally long enough (a few kilometers) which require really healthy rescue members to walk through in harsh, polluted, dangerous and dark environments. Some team members have duty to records the situations rescue team come across and report (communicate) them to main rescue head office (usually at the surface) for evaluation. Some team members have duties related with "First-Aid" applications. These workers have enough education and training certificate to supply required first-aid helps for injured victims, workers, in underground accident chambers.

# ADVANCED LIFE SUPPORT (ALS) REQUIREMENTS FOR INJURED UNDERGROUND EMPLOYEES

In last years new concerns have been pointed for the mine accident victims who need more treatment than first-aid level. Advanced life support (ALS) services were advised to be more effective in more complex health procedures come across in mine accident cases (Enright etal, 2016). Experiences obtained from several mine rescue works attended by Calkaya (2018) in Turkey have also caused to reach a decision that, mine rescue operations in Turkey need to be re-arranged to include more effective life saving operations including advanced life support (ALS) services. In mining engineering departments, there are several lectures that students have been supplied with information and knowledge for safe mine operations. In these lectures, several procedures have been given to students to prevent mine accidents either minor scale or major scale (mine disasters). In some universities there are experimental mines to train underground rescue teams (organized for students or trainees). Beside of these training activities given by universities, private companies, governmental mine safety offices and societies of mine engineers; accidents in underground have still been observed. Countries which have underground workplaces have supplied their statistical evaluations to understand reasons of the mine accidents to enforce new upgrades in required sectors. That means, "underground rescue team" activities have seriously been considered for all underground activities. Related law enforcements have been supplied for any type of underground activities. There should be "engineered plan" to rescue employees and other people trapped in underground in any case of accidents at; underground heritage museums, historical underground cities, metro tunnels and stations, rail and highway tunnels, underground hotels and cafes, underground storages for commercial purposes, underground repositories for radwaste or other waste materials, underground passages for shopping centers, underground sport and parking places, underground mines etc. Mine employees and people using underground spaces should definitely be informed about emergency stages. Required rescue operations must be planned for these underground openings in engineering way. Since there is no way to eliminate underground accidents totally, then organizations and companies responsible from underground activities should be ready for their unexpected accidents as prepared as possible. Despite precautions if an underground workplace accident was happened, there are certain procedures to follow by workers, engineers, local police, local people and governing bodies (NMA, 2015; Calkaya&Gokay, 2016). These steps have been documented for "first moment accident reporting" and mine accident rescue operations in literature (Kowalski etal, 2010).

When an accident related with underground openings was reported, national based "Underground accident governing authority" should immediately be called on duty (organized according to legislations) and this rescue center is charged to handle the accidents. Accident site security, communication with media and families, calling the underground (mine) rescue teams in duty, and other related duties are controlled under their responsibilities. Positive experiences together with deficiencies of this authority directly influence life of victims trapped in underground.

When the rescue teams enter the mine by obeying all necessary precautions they trained before, they have to clear the debris away from the galleries or they have to excavate passage galleries to reach accident chambers, openings. During these duties, when they come across the victims of underground (mine) accidents, they have to decide quickly to move the victims from their dangerous location and transport them to safer first-aid locations in underground. Moving victims from their original locations have many health related parameters in addition to factors related with underground openings stabilities and gasses. Experiences reported by Calkaya (2018) presented that "Advanced life support", (ALS), members are required in some case to handle the accident victims' health conditions as Enright, etal., (Enright etal, 2016) reported also. For example, one of the experienced military doctor's rescue service in an underground coal mine which had terrible accidents has still been remembered by local people and miners at Springhill, Nova Scotia, Canada, (CH, 2018). Some accidents related with underground openings (especially methane explosions at coal mines) have exploded workplace sceneries similar to bombed grounds of war fields. Therefore mine rescue members should also be trained physiological manner as well to bear the situations they might see around the accident locations in underground.

Engineers have to pre-organize their rescue operations for different accident scenarios. These operations include different cases of rescue plans and rescue team member selection. Rescue teams have then trained and performed drills to get experiences in trapped-workers search and rescue procedures. In addition, they have guided in controlling keyfigure machinaries which perform critical functions in mine ventilation, mine water pumping etc. One or two members of the underground rescue teams are capable to supply first-aid procedures. The question should be asked here, how the rescue team members evaluate health conditions of victims trapped due to underground accidents. These decisions include their own responsibility levels. When the rescue teams clear their way and reach to accident locations in an underground mine which had already mine accidents, there may be wounded workers around. Following options (hypotetical evaluation) should be considered to evaluate complexity of the situations; i) victims' wounds are first-aid types, or ii) these wounds or traumas are complex. In dark underground environment, first-aid members of underground (mine) rescue team should decide quickly to help these victims. What is the level of correctness of their decision under extraordinary circumstances? If they reach faulty decisions what happens to the victims. Another question arose also that; what will be the moral situation of that rescue members in the following years. These kinds of decisions have negative effects on physiology of the team members. There may be legislative responsibilities as well. The question again should be asked here; Do you want to be a member of underground rescue team them? As a member of team, your life is under danger, because you are entering underground accident area; you may come across accident sceneries you may not forgot them in all your life. You may save mine accidents' victims that may be good for you, but you may not save some of them. As a member of team, are you sociologically and physiologically ready for that? Experienced gained by earlier practices pointed also that; these conditions and questions should deeply be considered during mine rescue team arrangements, (Yilmaz, 2006). The team members have to be supported during and after rescue operations. These facts should necessarily be included in underground rescue team legislations. Companies and organizations should be informed for their legislative support responsibilities during and after the rescue operations on these team members. In this paper, following hypotetical underground rescue situations are put forwarded for further considerations and evaluations by related mine and health realated professionals;

- *i)* In victim searching phases of underground accident, what will be the responsibilities, if the victims can not be found around?
- *ii) If there are obstructs to reach victims site and that obstructs can not be eliminated, what will be the resultant decisions?*
- *iii)* If there are several obstructs to reach victims and eliminating that features are going to damage some of the victims body parts (or may cause deadly results for some of the victims), what will be the resultant decisions?
- v) If there are obstructs to reach some body parts of victims, who is going to decide that body parts are totally damaged, so it is better to cut. To save the victims, if the decision was already given for similar situations, who is going to perform the operations without causing complications for victim's health situations? What will be the legislative responsibilities about similar situations?
- *vi*) Underground accident sites include victims who have different traumas and they might be in shocked stage, if there is no ALS doctor-medic to handle the situation, who is going to save the victims?

These and many other factors (possibilities) should be considered and described in details at related rescue legislations for any kind of underground openings. Underground openings need particular design procedure. Design engineers should take all precautions for any type of underground accidents. For difficult circumstances in case of accident cases; underground openings may need extra first-aid access galleries and shafts in addition to especially designed sheltered rooms (sheltered room supply for underground coal mines in some countries are required by law enforcement). These features have gradually supplied for some coal mines but, what about the other underground activities, including metal mines, metro systems, businesses related with underground; passageways, storages, hotels, repositories

etc. People might be tramped there for different causes should have opportunities similar to planned coal mines which have extra first-aid access galleries, shafts etc. and safer sheltered rooms.

#### CONCLUSIONS

Underground openings have their own working conditions. Mine gasses and stresses acting on them have been evaluated in rock mechanics together with mine design considerations. Besides precautions, enforced mining safety laws/legislations, there may be workplace accidents in underground mines. Moreover, underground spaces have been used for different purposes and responsible people acting for the managements of these occupations have not seemed to understand perfectly the difficulties of underground workplaces and its safety precautions in detail like mine engineers. Tunnels, depots, machine openings, caves, passageways, hotels, cities etc. are the ones where people have started to work in underground openings. Any accidents happened in these workplaces require "mine rescue team" like operations. Companies responsible from those workplaces should ask themselves if they are ready for accidents, as big as underground mine disasters. Victims injured terribly in underground accidents have mostly been handled by rescue teams which have only first-aid health experiences. If there is long distance to go out of underground, these victims might lose their life due to time required to transfer (carry) them to surface health facilities. In this paper, advance life support (ALS) service required in most of the underground accidents is put forward for evaluation. Special medical practitioners, medical doctors who have expertise on underground accidents might be the answers to save more life at underground accidents. They should be trained and equipped to act in underground, especially at underground accident sites. If there are gaps in legislation and in their work definitions, for the requirements of ALS, these facts should be evaluated in detail to regulate. Ethical responsibilities are belongs to underground design engineers for taking all possible precautions to save workers life in case of underground accidents. However, legislative people (by applying joint works with mine & underground-space designer) should also complete all possible (thinkable) rules/legislations for underground openings and involve possible mine accident cases including ALS applications for rescue operations.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

In this work of study, Mr. Mevlut Calkaya's, (Mine engineer, MSc), contributions were noteworthy. He was coal mine rescue team member.

#### REFERENCES

- Bieniawski, Z.T., 1992, Design methodology in rock engineering: Theory, education and practice, Balkema Press, ISBN 90-5410-126-1, Netherlands.
- Calkaya, M. (2018) Mine rescue, (personal communication), Konya, Turkey.
- Calkaya, M. and Gokay M.K., 2016, What can be the actions following a coal mine accident, *International Symposium on Occupational Safety and Hygiene*, (ISBN 978-989-98203-6-4, Eds. Arezes, P. etal), 23-24 March 2016, Guimaraes, Portugal, pp25-27.
- Capstone, 2015, EmergencyResponse plan, Capstone Minto mine, March 2015, Canada.
- Catakci, S., 2016, Tahlisiye egitimleri ve uygulamalarinin incelenmesi, *Thesis for Work&Workplace safety*, Ministry of Labour and Social Security of Turkey, Ankara.
- CH, 2018, Arnold Burden, legendary Springhill mine disaster doctor, dies, Saltwire Network, Internet page: http://thechronicleherald.ca/novascotia/1554392-arnold-burden-legendary-springhillmine-disaster-doctor-dies, The Chronicle Herald, Published March 19<sup>th</sup> 2018.
- Conti, R.S., Chasko, L.L. and Stowinsky, L.D., 1998, Mine rescue training simulations and technology, Disaster and Emergency Management: International Challenges for the Next Decade, May 1998, pp453-464, NIOSH's Pittsburgh Research Laboratory, Web page, https://www.cdc.gov/ niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/mrts.pdf

- Enright, C., Harman, C.S. and Brune, J., 2016, Advanced life support in the mining environment, *Annual conference and exhibition, Society of Mininig Metallurgy and Exploration,* Phoenix, US.
- Erdogan, H.H., 2016, "A quantitative risk assessment methodology for occupational accidents in underground coal mines: a case of Turkish hard coal enterprises", *PhD thesis*, The Graduate School of Applied and Natural Sciences of Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Fernando, R., Dedig, B. and Armstrong, K., 2007, Emergency shelters and effect on rescue plans, 3rd International Mine Rescue Conference, IMRC2007, Drager Safety Inc., DRF/WD, July 2006, p20.
- Gokay M.K. & Shahriari, M., 2016, Design: Relation with occupational safety in mines, 8th International Conference on Occupational Safety and Health, 8-11May 2016, Halic Congress Centre, pp722-729, Istanbul.
- Gokay M.K. & Shahriari, M., 2017, Mine design evaluation for safe mine workplaces, International Symp. on Occupational Safety and Hygiene, ISBN 978-989-98203-7-1, (Eds. Arezes, P. etal), 10-11 April 2017, Guimaraes, Portugal, pp13-15.
- Hall, C. and Snelling, W.O., 1907, Coal mine accidents: Their causes and prevention, A preliminary statistical report, Department of the Interior, United States Geological Survey, Series Q, Fuel 7, Bulletin: 333, Government Printing Office, p23, Washington, USA.
- Hooker, K. and Shalit, M., 2000, Subterranean medicine: an inquiry into underground medical treatment protocols in cave rescue situations in national parks in the United States, *Wilderness and Environmental Medicine*, V11, N11, pp17-20.
- HSE, 1993, First aid at mines, Health and safety (fisrt-aid) regulations 1981, Advanced code of practice, HSE, Health and Safety Executive, HSE Books, ISBN 9780717606177.
- HSE, 2001, *Guidance and information on escape from mines*, Health and Safety Executive, The Deep Mined Coal Industry Advisory Committee, HSE Books, The Office of Public Sector Information, Information Policy Team, Surrey, UK, p46.
- ILO, 1986, *Safety and health in coal mines*, International Labour Organisation, (ILO) Code of Practice, ISBN 92-2-105339-3, International Labour Office, Geneva, Swiss.
- Kowalski-Trakofler, K.M., Vaught, C., Brnich Jr., M.J., and Jansky, J.H., 2010, A Study of First Moments in Underground Mine Emergency Response, Journal of Homeland Security and Emergency Management, V7, N1, Jan, 2010, DOI: 10.2202/1547-7355.1652.
- Lehnen, F.P., 2016, *Mine Rescue management, Dipl.Wirt.Ing. Thesis*, VonDer Fakultat für Georessourcen und Materialtechnik der Reheinisch-Westfalischen Technischen Hochschulu Aechen, Germany.
- Mischo, H., Brune, J.F., Weyer, J. and Henderson, N., 2014, Mine disaster and mine rescue training courses in modern academic mining engineering programs, J. of the S.African Institute of Mining and Metallurgy, V114, N12, ISSN 2225-6253, Johannesburg, SA.
- Muezzinoglu, A., 2015, Role of Occupational Physician in Mining Accidents, Turk Thorac Journal, V16, N1, pp21-24, DOI: 10.5152/ttd.2015.006
- NIOSH, 2015, Mining Topic: Rescue Technologies and Training, National Institute for Occupational Safety and Health, Mining Program, USA.
- NMA, 2015, Underground Emergency Response Plan, Module 6, USA, Web page: www.coresafety.org, p46, Retrivewed Apr. 10<sup>th</sup> 2018.
- NSW, 2010, New South Wales Government, Australia, Industry & Investment, Guidelines, MDG 1020 (Guidelines for underground emergency escape systems and the provision of self rescuers), MDG 1022 (Guidelines for determining withdrawal conditions from underground coal mines), and (Guidelines for in-seam response using CABA for events when life is at risk), www. legistlation.nsw.gov.au, p76.
- Patterson, J.M., 2009, "Human error in mining: a multivariable analysis of mining accidents/incidents in Queensland, Australia and the United States of America using the human factors analysis and classification system framework". PhD Thesis, The Graduate School of Clemson University, Industrial Engineering Dept. Australia. p143.

- Saleh, J.H. and Cummings, A.M., 2011, Safety in the mining industry and the unfinished legacy of mining accidents: Safety levers and defense-in-depth for addressing mining hazards. *Safety Science*, V49, pp764–777.
- Stacey, T.R., Terbrugge, P.J and Wesseloo, J., 2007, Risk as a rock engineering design criterion, Chapter-1, pp19-25, in Challenges in deep and high stress mining (Eds. Potvin, Y., Stacey, T.R. and Hadjigeorgiou, J.), Australian Centre for Geomech., Perth.
- TTK, 2000, Kurtarma istasyonu ve kurtaricilar yonergesi, TTK, Turkiye Taskomuru Kurumu, Is Guvenligi Daire Baskanligi, Zonguldak, Turkey.
- USDL, 2008, Initial mine rescue team training: Coal and metal/nonmetal mines, U.S. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration, National Mine Health and Safety Academy, NSHA 3026.
- WVOMHST, 2008, The Manuel, Developing a comprehensive emergency preparedness planning manual for underground mining operations, West Virginia Office of Miners' Health, Safety and Training, West Virginia University-Mining Extension Service, p133.
- Yilmaz, B., 2006, Arama-kurtarma calisanlarinda travma sonrasi stres belirtileri ve travma sonrasi buyume ile iliskili degiskenler, *PhD Thesis*, The Graduate School of Social Sciences, Ankara University, p211, Ankara.



# METALİK MALZEMELERİN YÜKSEK HIZLARDAKİ EROZYON DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ

# <sup>1</sup>Ali İhsan BUDUR, <sup>2</sup>Hasan GEDİKLİ

<sup>1</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Arsin Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Trabzon, TÜRKİYE <sup>2</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon, TÜRKİYE <sup>1</sup>ali.budur@ktu.edu.tr

# (Geliş/Received: 27.09.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 14.02.2019)

**ÖZ**: Bu çalışmada, havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan AA6061, Ti-6Al-4V alaşımları ile SS304 paslanmaz çeliğinin yüksek hızlardaki erozyon davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Erozyon deneylerinin bir kısmı 90° sabit çarpma açısı için 100, 127, 170, 210, 250 m/s çarpma hızlarında gerçekleştirilmişken diğer kısmı 100 m/s sabit çarpma hızı için farklı çarpma açılarında (20, 30, 45, 60, 90°) gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda numunelerdeki kütlesel erozyon oranları; zamana, hıza ve açıya göre elde edilmiştir. İlave olarak malzemelerdeki hacimsel erozyon oranları hesaplanmış ve malzemelerde oluşan krater derinlikleri ölçülmüştür. Çalışmalar neticesinde en iyi erozyon performansı kütlesel kayıplar bakımından AA6061 alaşımında ve en kötü erozyon performansı SS304 paslanmaz çeliğinde görülmüştür. Hacimsel erozyon performansı ise en kötü AA6061 alaşımında belirlenmiş ve bu sonuç optik profilometre cihazı ile yapılan ölçümlerde de desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katı parçacık erozyonu, Yüksek hız, Ti-6Al-4V, SS 304, AA6061

# Experimentally Investigation of Solid Particle Erosion of Metallic Materials at High Speed

**ABSTRACT:** In this study, the erosion behaviors of AA6061, Ti-6Al-4V alloys and SS304 stainless steel, which are used commonly in the aviation industry, have been experimentally investigated at high speeds. A part of the erosion experiments were carried out at impact velocities of 100, 127, 170, 210, 250 m/s at a constant impact angle of 90°, the others carried out at different impact angles (20, 30, 45, 60, 90°) at a constant velocity of 100 m/s. As a result of the experiments, the mass erosion rates in the samples were measured and obtained the changes to time, velocity and angle. Also, the volumetric erosion rates in materials were calculated and the crater depths in the materials were measured. As a result of studies, the best erosion performance was obtained at AA6061 alloy and the worst at SS304 stainless steel. The worst volumetric erosion performance was obtained at AA6061 alloy and that supported in the measurements with optical profilometer.

Key Words: Solid particle erosion, High speed, Ti-6Al-4V, SS304, AA6061

# GİRİŞ (INTRODUCTION)

Havacılık endüstrisinde hafiflikleri nedeniyle alüminyum ve titanyum alaşımları yaygın olarak kullanılan metalik malzemelerdir (Güler, 2003). Alüminyum alaşımları; mukavemetleri, şekillendirilebilmeleri, kaynak yapılabilmeleri ve korozyon dirençlerinin yüksek olmasından dolayı hava araçlarında yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Bu alaşım türü, uçak iniş takımlarında, yağ pompalarında, borularda ve kaynaklı parçalarda kullanılmaktadır (Zincir, 1975). Ti-6Al-4V alaşımı yüksek korozyon dayanımına sahiptirler ve yüksek çalışma sıcaklıklarında iyi mukavemet göstermektedir. Bu özellikleri nedeniyle uçakların gaz türbin kompresör kapakçıklarında, disklerinde ve

uçak çatılarında tercih edilen bir alaşım türüdür (Avcu, 2013). Paslanmaz çelikler ise kaynak kabiliyetleri ve yüksek korozyon dayanımlarının nedeniyle havacılıkta uçak motor parçalarında ve iniş takımlarında kullanılmaktadırlar (Akdoğan, 2003).

Katı parçacık erozyonu önemli bir hasar türü olup, sıvı veya gaz ortamındaki küçük katı parçacıkların bir yüzeye tekrarlı çarpmaları sonucu oluşturdukları aşınma olarak tanımlanmaktadır (Shimizu ve diğ., 2001). Katı parçacık erozyonu, pnömatik taşıma sistemleri, boru hatları, petrol ve gaz kuyuları, gaz türbin kanatçıkları, helikopter palleri ile tozlu ortamlarda çalışan makina parçalarda yaygın olarak görülmekte olup, parçaların performansları ve çalışma ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır (Finnie 1960, Hutching, 1976, Rana 1989, Parsi, 2015). Katı parçacık erozyonu; hedef yüzeyin malzeme özellikleri ile yüzeye çarpan parçacıkların çarpma açısı, çarpma hızı, şekli ve boyutu gibi pek çok parametreye bağlıdır (Oka 2005, Bousser 2014). Çarpma açısı, katı parçacık erozyonunu etkileyen önemli parametrelerden biri olup, aşındırıcı parçacıkların hedef malzeme yüzeyine çarptıkları noktada, yüzeyin teğeti ile parçacığın çarpma çizgisi arasındaki açı olarak tanımlanmaktadır (Nsoesie, 2013). Yapılan çalışmalar sünek ve gevrek malzemelerde maksimum erozyon miktarının farklı parçacık çarpma açılarında gerçekleştiğini göstermektedir. Finnie (1958), yapılğı bir çalışmada sünek ve gevrek malzemelerin katı parçacık erozyonu davranışının parçacık çarpma açısına göre değişimi incelemiştir. Bu çalışma sonucunda sünek malzemelerde maksimum erozyon miktarının 15–30° arasında, gevrek malzemelerde ise 90° de gerçekleştiğini belirlemiştir.

Katı parçacık erozyonuna etki eden diğer önemli bir parametre ise aşındırıcı parçacıkların çarpma hızıdır. Hedef malzeme yüzeyine çarpan katı parçacıkların yüzeyde erozyon hasarı oluşturabilmesi için hızlarının kritik bir seviyede olması gerekmektedir. Emilani ve Brown (1984), Ti-6Al-4V alaşımı yüzeyine 210 µm boyutlarında küresel katı parçacıkları püskürterek yaptıkları erozyon deneylerinde, 20-30° parçacık çarpma açısında maksimum erozyon miktarının 61 m/s parçacık çarpma hızında oluştuğunu tespit etmişlerdir. Morrison ve Scattergood (1986), 304 paslanmaz çelik malzemenin erozyon davranışını incelemek üzere yaptıkları çalışmalarında 37-270 µm boyutlarında alümina aşındırıcı parçacıkları kullanmışlardır. Çalışmalar sonucunda 100 m/s parçacık çarpma hızında yapılan deneylerde erozyon oranlarını 0.4 ile 1.0 mg/g arasında elde etmişlerdir. Yerramareddy ve Bahadur (1990), silikon karbür parçacıklarını kullanarak Ti-6Al-4V malzemesin erozyon davranışını araştırdılar. Erozyon deneyleri sonucunda, titanyum alaşımı için maksimum erozyon miktarını 30° çarpma açısında elde etmişlerdir. Zhou ve Bahadır (1995), Ti-6Al-4V malzemesinin 25-800 °C sıcaklık aralığındaki erozyon davranışlarının incelemişlerdir. Araştırmacılar deneylerinde 120 grit silikon karbür parçacıklarını hedef malzeme yüzeyine farklı çarpma hızı (55- 110 m/s) ve çarpma açılarında (10- 90°) göndermişlerdir. Deneyler sonucunda Ti-6Al-4V malzemesi için maksimum erozyon miktarını 30° parçacık çarpma açısında yapılan deneylerde elde etmişlerdir. Ayrıca erozyon miktarının sıcaklığın artmasıyla arttığını ve özellikle 90° çarpma açısında 650 - 800 °C arasında erozyon miktarının aşırı arttığını gözlemlemişlerdir. Oka ve arkadaşları (Oka ve diğ., 2005) sünek metallerde 325 µm boyutunda silica kumu ile yaptığı deneylerde, erozyon oranının maksimum 20° - 35° arasında olduğunu belirlemiştir. Ally (2010), AA 6061, Ti-6Al-4V ve 316 paslanmaz çelik malzemelerinin aşınma davranışlarını birbirleriyle kıyaslamak amacıyla yaptıkları erozyon deneylerinde, 50 µm boyutunda Al2O3 aşındırıcı parçacıklarını 106 m/s sabit çarpma hızında ve değişik parçacık çarpma açılarında (30, 45, 60 ve 90°) hedef yüzeye göndermiştir. Deneyler sonucunda kütlesel erozyon miktarının, en fazla 316 paslanmaz çelikte en az ise AA6061 alüminyum alaşımında olduğunu tespit etmiştir. Yıldıran (2013) yaptığı bir çalışmada, hedef malzeme yüzeyine çarpan parçacıkların hızlarının kritik bir değerin altında olması halinde plastik deformasyona yol açmadığı, bu değerin üstündeki hız değerlerinde ise yüzeyde plastik deformasyonlar yol açtığını gözlemlemiştir. Avcu (2013), Ti-6Al-4V alaşımı yüzeyinde değişik basınç (1.5, 3 ve 4 bar) ve değişik çarpma açılarında (30, 60 ve 90°) yaptığı erozyon deneylerinde, çarpan parçacıkların hızlarının çok yüksek olması durumunda malzeme yüzeyinde yerel erimelere neden olduğunu tespit etmiştir.

Bu çalışmada; AA 6061, SS 304, Ti-6Al-4V alaşımlarının, literatürden farklı olarak yüksek çarpma hızlarındaki katı parçacık erozyon davranışları incelenmiştir. Deneylerin bir bölümü 90° sabit parçacık çarpma açısı için100, 127, 170, 210, 250 m/s çarpma hızlarında gerçekleştirilmişken, diğer bölümü ise sabit

çarpma hızı 100 m/s için farklı parçacık çarpma açılarında (20, 30, 45, 60, 90°) gerçekleştirilmiştir. Erozyon deneyleri sonucunda malzemelerin kütlesel ve hacimsel erozyon performansları belirlenmiştir.

#### **MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)**

#### Deney Düzeneği (Test Setup)

AA6061, Ti-6Al-4V ve SS304 metalik malzemelerinin erozyon deneyleri, Şekil 1'de gösterilen erozyon deney düzeneği ile yapılmıştır. Bu deney düzeneği ile ASTM-G76 (ASTM, 2004), ASTM-F1864 (ASTM, 2010) ve MIL-STD-3033 (MIL-STD, 2010) standartlarına uygun erozyon deneyleri, ilgili standartlarda belirtilen lüle ve toz tipi kullanılarak yapılabilmektedir. Deney düzeneğinde bulunan 40 bar basınçı kapasiteli kompresör yardımıyla basınçlı hava ortamında hızlandırılmış katı parçacıkları numune yüzeyine gönderilmektedir. Sistemde bulunan bir nem alma cihazı yardımıyla deney esnasında kullanılan basınçlı havanın nemi alınmaktadır. İkincil basınç tankı içinde bulunan hassas dozajlama cihazı ile deney esnasında numune yüzeyine gönderilecek aşındırıcı parçacık miktarı ayarlanabilmektedir. Bu cihaz 0.2 g/dk hassasiyete kadar aşındırıcı parçacık miktarını ayarlayabilmektedir. Deneyler esnasında bir çok deney parametresinin (deney süresi, deney basıncı, katı parçacık besleme miktarı, numune tabla hızı ) takibi ve kontrolü, sistemde mevcut olan kontrol paneli ile yapılmaktadır.



Şekil 1. Erozyon deney düzeneği Figure 1. Erosion test setup

İkincil basınç tankında basınçlandırılan aşındırıcı parçacıklar, Şekil 2'de detaylı olarak verilen deney sistemi kabinine gönderilmektedir. Burada katı parçacıklar, 3.125 mm iç çaplı yakınsak-ıraksak lüle ile numuneye püskürtülmektedir. Parçacık çarpma açısı, açı şablonları kullanılarak 20, 30, 40, 45, 50, 60, 70, 80 ve 90° olarak ayarlanabilmektedir.



# Aşındırıcı Parçacık ve Hız Ölçümü (Abrasive Particle and Speed Measurement)

Erozyon deneyleri, Şekil 3'de SEM görüntüsü verilmiş olan 52 mikron boyutlarında alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) parçacıkları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Katı parçacıkların hız- basınç kalibrasyon eğrileri, Şekil 4'de gösterilen "Çift Disk Ölçüm Düzeneği" kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Ruff ve Ives, 1975). Kalibrasyon çalışmaları, deneylerde kullanılacak olan besleme miktarı (2,5 gr/dk) için yapılmıştır.



Şekil 3. Alümina parçacıklarının SEM görüntüsü Figure 3. SEM image of alumina particles

**Şekil 4.** Çift disk ölçüm düzeneği **Figure 4**. *Double disk measurement device* 

#### Krater Derinliklerinin Ölçülmesi (Crater Depth Measurement)

Erozyon deneylerine tabii tutulan numunelerinin yüzeylerinde oluşan krater derinlikleri, Şekil 5'de verilen üç boyutlu temassız lazer optik profilometre cihazı ile ölçülmüştür.



**Şekil 5.** Temassız lazer optik profilometre **Figure 5.** *Non-contact laser optical profilometer* 

#### **BULGULAR** (RESULTS)

#### Erozyon Miktarının Zamana Göre Değişimi (Change of Erosion Amount According to Time)

AA6061, Ti-6Al-4V ve SS304 metalik malzemelerinin erozyon miktarının zamana göre değişimleri Şekil 6 – 11' de verilmiştir. Şekil 6'da Ti-6Al-4V alaşımında 100 m/s sabit parçacık çarpma hızındaki değişik parçacık çarpma açılarında oluşan erozyon miktarının zamana göre değişimi verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere en düşük erozyon miktarı 90° parçacık çarpma açısında elde edilmiştir. İlk 4. dakikada erozyon miktarı; 3.50 mg iken 8., 12. ve 16. dakika sonunda sırasıyla 6.60, 10.40 ve 13.37 mg olarak elde edilmiştir.



**Şekil 6.** Ti-6Al-4V malzemesi için 100 m/s parçacık çarpma hızı ve farklı çarpma açılarındaki kütlesel erozyon miktarının zamana göre değişimi

Figure 6. Mass erosion variation vs. time for Ti-6Al-4V material at particle impact velocity of 100 m/s and different impact angles

Şekil 7'de Ti-6Al-4V alaşımının 90° parçacık çarpma açısı değerinde, farklı parçacık çarpma hızındaki erozyon miktarının zamana göre değişimi verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi en düşük erozyon miktarı 100 m/s hız değerinde elde edilmişken, çarpma hızı arttıkça erozyon miktarı artmaktadır. Örneğin Ti-6Al-4V alaşımındaki erozyon miktarı; 100 m/s çarpma hızında 4., 8., 12. ve 16. dakika sonunda sırasıyla 3.50, 6.60, 10.40 ve 13.70 mg olarak elde edilmiştir. 127 m/s hız değerindeki erozyon hasarları ise 4., 8., 12. ve

16. dakika sonunda sırasıyla 5.80, 12.05, 18.00 ve 24.05 mg olarak elde edilmiştir. 170 m/s hızında yapılan deneylerde ise 4. dakika sonunda 11.15 mg erozyon miktarı ölçülmüştür. Bu erozyon miktarı diğer dakikalarda beklendiği gibi zamanlar doğrusal olarak artmıştır. 210 m/s' lik parçacık çarpma hızındaki deneyler için ise aynı dakikalar sonunda yapılan ölçümlerde sırasıyla 18.40, 37.35, 56.25 ve 75.40 mg erozyon değerleri elde edilmiştir. Son olarak 250 m/s parçacık çapma hızında yapılan deneylerde ise maksimum erozyon miktarı elde edilmiş olup 4., 8., 12. ve 16. dakika sonunda sırasıyla 28.15, 56.35, 84.50 ve 112.30 mg olarak belirlenmiştir.



**Şekil 7.** Ti-6Al-4V malzemesi için 90° çarpma açısı ve farklı parçacık çarpma hızlarındaki kütlesel erozyon miktarının zamana göre değişimi

Figure 7. Mass erosion variation vs. time for Ti-6Al-4V material at impact angle of 90 and different particle impact velocities

Şekil 8 ve Şekil 9'da ise AA6061 alaşımındaki değişik parçacık çarpma açısı ve hızlarında meydana gelen kütlesel erozyon miktarının zamana göre değişimleri verilmiştir. AA6061 malzemesi için zamana göre elde edilen erozyon miktarı, Ti-6Al-4V alaşımına benzer şekilde doğrusal olarak artmıştır.



Şekil 8. AA6061 malzemesi için 100 m/s parçacık çarpma hızı ve farklı çarpma açılarındaki kütlesel erozyon miktarının zamana göre değişimi

Figure 8. Mass erosion variation vs. time for AA6061 material at particle impact velocity of 100 m/s and different impact angles



Şekil 9. AA6061 malzemesi için 90° çarpma açısı ve farklı parçacık çarpma hızlarındaki kütlesel erozyon miktarının zamana göre değişimi Figure 9. Mass erosion variation vs. time for AA6061 material at impact angle of 90 and different particle impact velocities

Şekil 10 ve Şekil 11'de ise SS304 malzemesindeki değişik parçacık çarpma açısı ve hızlarında meydana gelen kütlesel erozyon miktarının zamana göre değişimleri verilmiştir. Grafiklerden kütlesel erozyon miktarının zamana göre değişimleri diğer malzemelere olduğu gibi hemen hemen doğrusal artmıştır.



**Şekil 10.** SS304 malzemesi için 100 m/s parçacık çarpma hızı ve farklı çarpma açılarındaki kütlesel erozyon miktarının zamana göre değişimi

Figure 10. Mass erosion variation vs. time for SS304 material at particle impact velocity of 100 m/s and different impact angles





Figure 11. Mass erosion variation vs. time for SS304 material at impact angle of 90 and different particle impact velocities

#### Erozyon Miktarının Çarpma Açısına Göre Değişimi (Change of Erosion Amount According to Impact Angle)

Erozyon miktarının parçacık çarpma açısına göre değişimleri Şekil 12 ve Şekil 13' de verilmiştir. Şekil 12'de, 100 m/s parçacık çarpma hızında yapılan deneyler sonucunda elde edilen kütlesel erozyon oranının parçacık çarpma açısına göre değişimleri verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi, kütlesel erozyon oranı en fazla SS304 paslanmaz çeliğinde elde edilmiştir. Bu malzemede maksimum erozyon oranı 30° çarpma açısında görülürken minimum ise 90° parçacık çarpma açısında görülmüştür. Ti-6Al-4V alaşımında, SS304 paslanmaz çeliğine oranla daha az kütlesel erozyon oranı görülmüştür. Bu alaşımında maksimum kütlesel erozyon oranı 20° çarpma açısında, en düşük erozyon oranı ise 90° çarpma açısında elde edilmiştir. En iyi kütlesel erozyon oranı performansı AA6061 alaşımında görülmüştür. Bu malzeme de diğer metalik malzemelerindekine benzer erozyon davranışı elde edilmiş olup, maksimum kütlesel erozyon oranı 30° çarpma açısında, minimum kütlesel erozyon oranı 90° çarpma açısında elde edilmiştir.





Figure 12. Mass erosion rate variation vs. impact angle for SS304, AA6061 and Ti-6Al-4V materials at particle impact velocity of 100 m/s
Erozyon hasarında krater derinliği malzemenin delinmesinde önemli bir ölçü olmaktadır. Bu sebeple yukarıda kütlesel olarak verilen erozyon oranları ayrıca hacimsel olarak ta hesaplanmıştır. Hacimsel erozyon oranları kütlesel erozyon miktarının malzemenin kendi yoğunluğuna bölünmesiyle elde edilmiştir.

Şekil 13'de deney numunelerine ait hacimsel erozyon oranlarının çarpma açısına göre değişimleri verilmiştir. Grafikten görülebileceği üzere; en iyi hacimsel erozyon oranı SS304 malzemesi için elde edilmişken, bunu Ti-6Al-4V ve AA6061 alaşımları takip etmiştir. Kütlesel erozyon oranı bakımından en iyi performansı gösteren AA6061 alaşımı, hacimsel erozyon oranında en kötü durumda olmuştur. Bunun nedeni AA6061 alaşım yoğunluğunun (2700 kg/m<sup>3</sup>) diğer SS304 (7850 kg/m<sup>3</sup>) ve Ti-6Al-4V (4428 kg/m<sup>3</sup>) numunelerine göre daha düşük olmasıdır.



Şekil 13. SS304, AA6061, Ti-6Al-4V malzemelerinde100 m/s parçacık çarpma hızındaki hacimsel erozyon oranının çarpma açısına göre değişimleri
 Figure 13. Volumetric erosion rate variation vs. impact angle for SS304, AA6061 and Ti-6Al-4V materials at particle impact velocity of 100

m/s

#### Erozyon Miktarının Çarpma Hızına Göre Değişimi (Change of Erosion Amount According to Impact Velocity)

Erozyon deneyleri sonunda malzemelerde meydana gelen kütlesel erozyon oranının parçacık çarpma hızına göre değişimleri Şekil 14'de bir arada verilmiştir. Kütlesel erozyon oranı en yüksek SS304 paslanmaz çeliğinde elde edilmişken, en düşük AA6061 alaşımında elde edilmiştir. Erozyon oranları 120 m/s hızından sonra önemli derecede artış gösterirken kütlesel erozyon oranları literatürdeki çalışmalarla uyumlu olarak doğrusal olmayan bir şekilde artmıştır.



Şekil 14. SS304, AA6061, Ti-6Al-4V malzemeleri için 90° parçacık çarpma açısındaki kütlesel erozyon oranının parçacık çarpma hızına göre değişimleri

Figure 14. Mass erosion rate variation vs.particle impact velocity for SS304, AA6061 and Ti-6Al-4V materials at particle impact angle of  $90^{\circ}$ 

#### Krater Derinlikleri (Crater Depths)

Sabit 90° parçacık çarpma açısında yapılan erozyon deneyleri sonrasında, numune yüzeylerinin deforme olmuş görüntüleri Şekil 15'de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere çarpma hızının artmasıyla bütün malzemeler için krater derinlikleri de artmaktadır.



Şekil 16'da ise 90° parçacık çarpma açısında numunelerde meydana gelen krater derinliklerinin grafikleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde en düşük krater derinliği 99.17 µm değeri ile SS304 paslanmaz çeliğinde elde edilmişken en yüksek krater derinliği 127.55 µm ile AA6061 alaşımında elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler, krater derinlikleri numunedeki hacimsel erozyon oranları ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, Şekil 13'te belirtilen, en iyi erozyon davranışı SS304 çeliğinde ve en kötü erozyon davranışının AA6061 alaşımında görüldüğü sonucuyla uyumludur.



**Figure 16.** Crater depths of materials at 90° impact angle (a) AA606, (b) SS304, (c) Ti-6Al-4V



Şekil 17. Ti-6Al-4V numunesinde deney sonrası elde edilen optik mikroskop görüntüleri Figure 17. Optical micrograph images of Ti-6Al-4V sample after experiment

#### SONUÇLARIN İRDELENMESİ (DISCUSSIONS)

Bu çalışmada mühendislikte yaygın olarak kullanılan AA6061, SS304 ve Ti-6Al-4V metalik malzemelerinin yüksek hızlardaki katı parçacık erozyon performansları incelenmiştir.

Erozyon miktarı zamana göre her açı değeri için literatürle de uyumlu olarak doğrusal artarken, parçacık çarpma hızı ile doğrusal olmayan bir şekilde artmıştır (Hadavi ve diğ., 2015, Atroshenko ve diğ., 2017).

Deney sonrası numune yüzeylerinde oluşan krater derinlikleri incelendiğinde (Şekil 16) ise hacimsel erozyon performanslarına paralel olarak en yüksek krater derinliği AA6061 alaşımında, en düşük krater derinliği ise SS304 paslanmaz çeliğinde elde edilmiştir.

Şekil 17 de Ti-6Al-4V alaşımının 90° çarpma açısı için test sonrası optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 17b incelendiğinde Ti-6Al-4V alaşımının yüzeyinde, aşındırıcı tozların mikro kesme ve kazıma ile erozyona neden olduğu görülmektedir. Parçacıklar, numunenin bazı bölgelerinde plastik deformasyonlar ile çukurlaşmalara neden olurken bazı noktalarda numunelere yapışmaktadır (Şekil 17c). Bu da deney esnasında sünek malzemelerde görülen inkübasyon safhasının oluştuğunu göstermektedir. Bu davranış literatürdeki sünek malzemelerdeki erozyon mekanizmasıyla da uyuşmaktadır (Finnie,1960).

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Ally (2010) ve Yarramedy (1990)' nin yapmış oldukları deneysel çalışmalarla karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 18' de verilmiştir. İki araştırmacı da hedef malzeme olarak Ti-6Al-4V kullanmışlardır. Ally aşındırıcı parçacık olarak 50 µm nominal boyuttaki alümina parçacıklarını hedef malzemeye (Ti-6Al-4V) 106 m/s parçacık çarpma hızı ile göndermişken, Yarramedy 125 µm boyutundaki silikon karbit kullanmış ve çarpma hızı olarak ta 55 m/s yi seçmiştir. Bizim çalışmamızda ise, Ti-6Al-4V Grade 6 alaşımı için erozyon testleri, 50 µm alümina parçacıklarının 100 m/s parçacık çarpma hızı ile hedef yüzeye fırlatılmıştır. Her üç sonuçta çarpma açısına göre maksimum erozyon oranları 20-30° de elde edilmiş olup erozyon oranlarında sapmalar oluşmuştur. Sonuçlar arasındaki farkların nedenleri arasında; kullanılan malzemelerin farklı ısıl işleme tabi tutulması, katı parçacıklarını farklı özelliklere sahip olması ve katı parçacık hızlarının yaklaşık ölçülmesi sayılabilir.



**Şekil 18.** Ti-6Al-4V alaşımlarının kütlesel erozyon oranlarının karşılaştırılması **Figure 18.** Comparison of mass erosion rate-impact angle behavior of Ti-6Al-4V alloys

Şekil 19' da ise Ally'nin aynı çalışmasındaki AA6061 alaşımında elde ettiği sonuçlar ile bu çalışmada elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çarpma açısına göre maksimum erozyon oranları titanyum alaşımında olduğu gibi 20°- 30° arasında elde edilmiş ancak değerlerde sapmalar oluşmuştur. Bu sapmalar titanyum kısmındaki benzer ifadelerle açıklanabilir.



Şekil 19. AA6061 alaşımlarının kütlesel erozyon oranlarının karşılaştırılmasıFigure 19. Comparison of mass erosion rate-impact angle behavior of AA6061 alloys

#### **KAYNAKLAR (REFERENCES)**

Akdoğan, A., 10-12 Mayıs 2000, Uçak Endüstrisinde Kullanılan Metal ve Metal Dışı Malzemeler ve Bu Malzemelerin Muayene Yöntemleri, Kayseri 3. Havacılık Sempozyumu

Ally, S., 2010, Abrasive Jet Micro-Machining Of Metals, Master Thesis, Ryerson University, Canada,

- ASTM International, 2004, "Standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets." Designation: G 76 04,
- ASTM International, 2010, "Standard test method for dust erosion resistance of optical and infrared transparent materials and coatings." Designation: F1864 05.
- Atroshenko, S.A., Evstifeev, A.D., Kazarinov, N.A., Petrov, Yu. V., Valiev, R.Z., 2017, Behaviour of the grade 5 titanium alloy in different structural states in conditions of high-speed erosion. Procedia Structural Integrity, 190-195.
- Avcu, E., 2013, Titanyum Alaşımlarının Partikül Erozyonu İle Pürüzlendirilmesi ve Aşındırılması İşlemlerinin Optimizasyonu, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Bousser, E., Martinu, L., Klemberg-Sapieha, J.E., 2014, Solid particle erosion mechanisms of protective coatings for aerospace applications, Surface & Coatings Technology, 257, 165-181.
- Emiliani, M., Brown, R., 1984, The effect of microstructure on the erosion of Ti-6Al-4V by spherical particles at 90° impact angles. Wear 97, 323-338.
- Finnie, I., 1958, The Mechanism of Erosion of Ductile Metals, Proc. 3rd U.S. National Congress of Applied Mechanics, 527-532.
- Finnie, I., 1960, Erosion of surfaces by solid particles, Wear, 3: 87–103.
- Güler, K. A., 2003, Uçak Yapımında Kullanılan Malzemeler ve Özelliklerinin İncelenmesi, Bitirme Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Hadavi, V., Papini, M., 2015, Numerical modeling of particle embedment during solid particle erosion of ductile materials, Wear, 342-343,310-321.
- Hutchings, I.M., Winter, R. E. ,1976, Field JE. Solid particle erosion of metals: the removal of surface material by spherical projectiles, Proc. R. Soc., 348 (Ser A), 379-392.
- MIL-STD-3033, 2010. "Particle/sand erosion testing of rotor blade protective materials.".
- Morrison, C.T., Scattergood, R.O., Routbort, J.L., 1986, Erosion of 304 stainless steel. Wear 111, 1-13.
- Nsoesie, S., 2013, Experimental Investigation and Analytical Modeling of Solid-Particle Erosion Behavior of Stellite Alloys, Master Thesis, Carleton University, Canada.
- Oka, Y. I., Okamura, K., Yoshida, T., 2005, Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: part 1: effects of impact parameters on a predictive equation. Wear, 259, 1-6, 95-101.
- Parsi, M., Agrawal, M., Srinivasan, V., Vieira, R. E., Torres, C. F, Brenton, S., McLauryd, S. B., Shirazi, S. A., 2015, "CFD simulation of sand particle erosion in gas-dominant multiphase flow." Journal of Natural Gas Science and Engineering, 27, 706-718.
- Rana, F., Stefanescu, D. M., 1989, Friction properties of Al 1.5PctMg/SiC particulate metal-matrix composites, Metallurgical Transactions A, 20, 1564-1566.
- Ruff, A.W., Ives, L.K., 1975, Measurement Of Solid Particle Velocity İn Erosive Wear, Wear, 35, 195-199.
- Shimizu, K., Noguchi, T., Seitoh, H., Okada, M., Matsubara, Y., 2001, FEM analysis of erosive wear, Wear 250, 779–784.
- Yerramareddy, S., ve Bahadur, S., 1990, Effect of operational variables, microstructure and mechanical properties on the erosion of Ti-6Al-4V, Wear, 142, 253-263.
- Yıldıran, Y., 2013, 3003 H14 Alüminyum Alaşımının Katı Partikül Erozyon Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Zhou J., Bahadur S., 1995, Erosion-corrosion of Ti-6Al-4V in elevated temperature air environment, Wear, 186, 332-339.
- Zincir S., 1975, Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımları ve Özellikleri, Bitirme Tezi, Kimya Metalurji Fak. Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, , İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul



# BİR HİDROLİK DERİN ÇEKME PRES MAKİNESİNİN PLC TABANLI BULANIK MANTIK KONTROLÜ VE ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMASI

# <sup>1</sup>Ömer AYDOĞDU, <sup>2</sup>Ahmet ÇATKAFA

<sup>1</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE
<sup>2</sup>SECA Mühendislik Otomasyon Ltd. Şti., Konya, TÜRKİYE
<sup>1</sup>oaydogdu@ktun.edu.tr, <sup>2</sup>ahmetcatkafa@gmail.com

# (Geliş/Received: 16.01.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 18.02.2019)

ÖZ: Bu makalede bir derin çekme pres makinesinin PLC tabanlı bulanık mantık kontrolü gerçekleştirilmiştir. PLC ortamında Bulanık Mantık Denetleyiciler için bulanıklaştırma, çıkarım işlemi ve durulaştırma adımları ayrı bloklar olarak gerçekleştirilmiş, blokların program dâhilinde yürütülmesi ile kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir. PLC ortamında gerçekleştirilen bulanık mantık kontrol programı, derin çekme pres makinasında uygulanmış ve karşılaştırma amaçlı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca hidrolik derin çekme pres makineleri için Endüstri 4.0 kavramı incelenmiş, mevcut sistemlerle karşılaştırılması yapılmış ve mevcut sistemlerin Endüstri 4.0'a uyumları ele alınmıştır. Çalışmada, proje kapsamında iki farklı hidrolik derin çekme pres makinesi ele alınmıştır. Bunlardan biri klasik olarak kontrol edilen AC motor tahrikli sabit devir ve debide olan hidrolik güç ünitesi ile çalışan bir prestir. Diğer makine ise servo motor tahrikli değişken debili hidrolik pompanın bulunduğu hidrolik güç ünitesi ile çalışan sistemdir. Bu iki sistem arasında belirli özellikler için kıyaslama yapılarak Endüstri 4.0 uyumu ve üstünlüğü somutlaştırılmaya çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bulanık Mantık, PLC, Derin Çekme Pres Makinesi, Hidrolik Pres, Servo Pres, Endüstri 4.0

# PLC Based Fuzzy Logic Control Of A Hydraulic Deep Draw Press Machine

**ABSTRACT:** In this article, PLC based fuzzy logic control of a deep drawing press machine has been realized. In the study, blurry, inference process and clearing steps were carried out as separate blocks for Fuzzy Logic Controllers in PLC environment. Fuzzy logic control program implemented in PLC environment was applied on deep drawing press machine and comparison results were obtained. In addition, the concept of Industry 4.0 has been examined for hydraulic deep-drawing press machines, compared with existing systems and the compliance of existing systems with Industry 4.0 has been discussed. In this study, two different hydraulic deep drawing press machines are discussed. One of them is a conventional prestressed AC motor driven station with a constant speed and flow rate hydraulic power unit. The other machine is a hydraulic power unit with servo motor driven variable flow hydraulic pump. A comparison between these two systems has been made for specific features, and the convergence and superiority of Industry 4.0 has been tried to be concretized.

Keywords: Deep Drawing Press Machine, Fuzzy Logic, Hydraulic Press, Industry 4.0, Servo Press, PLC

### **GİRİŞ** (INTRODUCTION)

Hidrolik pres makineleri, bir elektrik motoru yada servo motor tahrikiyle çalıştırılan hidrolik pompanın, hidrolik bloğa basmış olduğu belirli basınç ve debideki hidrolik yağ ile çalışan endüstriyel araçlardır. Hidrolik blok üzerindeki valflere hidrolik güç ünitesinin elektrik mantık diyagramına göre enerjinin belirli bir sırada verilmesiyle blok hatlarından geçen basınçlı hidrolik yağ, pres makinesinin koç ve pot tablalarının silindirlerine ulaşır. Silindirlerin pistonlarını hareket ettirerek tablaların hareketi sağlanmış olur. Silindirlere gönderilen yağ miktarı ve basıncı kontrol edilebildiği için presin aşağı yukarı hızları ve tonajı istenen değerlerde ayarlanabilir. Bu özelliklerden dolayı özellikle derin çekme kalıplarında Şekil 1'de görüldüğü gibi hidrolik presler kullanılır.

Hidrolik **pres**lerin en belirgin özelliği her vuruşta aynı kuvveti uygulamaktır. Şekillendirme presinin ihtiyacı olan gücü üreten değişken hızlı pompa, tahrik sistemlerini içerecek hidrolik güç ünitesi, hidrolik pompa, kontrolör ve servo motordan oluşan kapsamlı bir sistemi içermesinin yanı sıra çevrim karakteristiğine ve yapılandırmasına dayanan bir yazılımdan oluşmaktadır. Bu sistem, basınç ve debi kontrol sistemini temel almaktadır.

Bu çalışmada, bir servo sürücü kullanılarak, sistem yağ hacmini ve basıncını kontrol etmek için dinamik ve çok ekonomik bir çözüm ortaya konulmuştur. Ayrıca, yeni tasarlanan hidrolik üniteden elde edilen verilerin karşılaştırılması için klasik sistemle yapılmış bir hidrolik güç ünitesi de çalıştırılmış ve deneysel test verileri elde edilmiştir (Bostan, 2011).



**Şekil 1.** Hidrolik derin çekme presi **Figure 1.** *Hydraulic deep drawing press* 

Endüstriyel bir sürecin denetimi için tasarım yapılırken her şeyden önce o sürecin bir dinamik modeline gereksinim vardır. Ancak pratikte bu her zaman mümkün olmayabilir. Süreç içerisindeki olaylar matematiksel modellemeye el verecek ölçüde açıkça bilinmeyebilir veya bir model kurulabilse bile bu modelin parametreleri zamanla değişiklikler gösterebilir (Yılmaz, 1999). Bazı durumlarda ise doğru model kurulsa bile bunun denetleyici tasarımında kullanılması karmaşık problemlere yol açabilir. Bu gibi sorunlarla karşılaşıldığı zaman genellikle uzman bir kişinin bilgi ve deneyimlerinden yararlanılma yoluna gidilir (Özçalık, 2008). Uzman kişi dilsel niteleyiciler (linguistic variables) olarak tanımlanabilecek; uygun, çok uygun değil, yüksek, fazla, çok fazla gibi günlük yaşantımızda sıkça kullandığımız kelimeler doğrultusunda esnek bir denetim mekanizması geliştirir. İşte bulanık mantık denetim de bu tür mantıksal ilişkiler üzerine kurulmuş bir yaklaşındır (Zadeh, 1971).

Bulanık mantığın sağladığı en büyük fayda ise "insana özgü tecrübe ile öğrenme" olayının kolayca modellenebilmesi ve belirsiz kavramların bile matematiksel olarak ifade edilebilmesine olanak tanımasıdır (Sinecen, 2002). Bu nedenle doğrusal olmayan sistemlere yaklaşım yapabilmek için özellikle uygundur. Bunun için kural tabanı oluşturulur. Kural tabanı incelenen konuya ilişkin insanlığın o güne kadar edindiği tüm gözlem, deneyim ve matematiksel bağıntıları yani tüm bilgiyi içermelidir. Kural tabanı ne kadar iyi ve geniş hazırlanırsa o kadar hassas ve doğru sonuçlar elde edilir (Saad, 2012). Bulanık mantık, fotoğraf makineleri, çeşitli elektronik beyaz eşyalar, füzeler, robotlar, otomasyon ve akıllı kontrol sistemleri, akıllı bina sistemleri ve otomatik iletim hatları gibi uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır (Da Ruan, 1998). Bu avantajlar dikkate alındığında, bir hidrolik derin çekme pres makinasının bulanık mantık kontrolü ile, sistemin kararılılığı ve enerji tasarrufu sağlayacağı öngörülmektedir. Çalışmada bu doğrultuda, bir PLC elemanı kullanılarak girişine gelen geri besleme bilgisini bulanık mantık kontrol algoritması ile işleyerek kontrol çıkışını güncelleyen bir kontrol donanımı tasarlanmıştır. Böylece, derin çekme pres makinalarında daha hassas ve daha kararlı bir çalışma amaçlanarak, sistemin daha verimli hale gelmesi sağlanacaktır.

Endüstri 4.0 kavramı, otomasyona yönelik sistemlerin saha sensörleri ve uç birimlerinden gönderilen verilere ve gelen verilerin işlenmesine dayanmaktadır. Endüstri 4.0 yaklaşımı ile, otomasyon sistemleri mevcut çalışma koşulları, performansı ve elde ettiği sonuçlar olarak sürekli ölçümlenmektedir. Toplanan veri, endüstriyel standartlarda veri aktarımına uygun ve yüksek güvenlikli iletişim sistemleriyle büyük veri merkezlerine iletilmektedir. Ardından, bu veriler yüksek performanslı analiz sistemleriyle anlamlı verilere ve somut aksiyonlara dönüştürülmektedir. Böylece; sistemlerin verimliliğini artıracak yeni yaklaşımların uyarlanması, sorun çıkaran bir bileşenin devre dışı bırakılarak iş yükünün diğer bileşenlere aktarılması gibi süreçlerin hepsi otomatik olarak gerçekleştirilmektedir (Kaynak, 1993). Yani, makineler ve sistemler kendi kendini yeniden ayarlamakta, kendi çalışmasını optimize etmekte, hatta yapay zekayı kullanarak yeni sorunlara yeni çözümler üretmektedir. İnsanların yerine karar vermekte ve uygulamaktadır (Kılıç, 2017). Bu, gelişen teknoloji yardımıyla kendi elde ettiği verileri kullanarak kendi süreçlerini yeniden düzenleyebilen, kendi çözümünü kendi üreten ve kendi kendini optimize eden makinelerin yer aldığı bir süreçtir (Selek, 2017). Bu çalışmada ayrıca, Hidrolik Derin Çekme Pres Makinesi (Hydraulic Deep Draw Press Machine) için Endüstri 4.0 uygulanabilirliği ele alınarak, avantajları ortaya konulacaktır.

#### PLC TABANLI BULANIK MANTIK KONTROL (PLC BASED FUZZY LOGIC CONTROL)

Bulanık mantık kontrol, Şekil 2'de görüldüğü gibi beş temel bileşenden oluşur. Bunlar; ölçekleme, bulanıklaştırma, bulanık bilgi ve kural tabanı, çıkarım birimi ve durulaştırmadır (Altaş, 1999). Bulanık mantık denetim işlemi optimum çıkışı elde etmek için genel olarak giriş bilgilerinin 0-1 aralığında bulanık küme (set) değerlerine dönüşmesiyle başlar. Daha sonra bilgi tabanına göre gerekli çıkarımlar sağlanarak oluşturulan kural tabanına göre uygun çıkış için bulanık küme (set) değerleri oluşturulur. En sonunda bu bulanık set değerlerinden durulaştırılmış kontrol çıkışı elde edilir (Özdemir, 2012).

Bulanık sistemde bilgi tabanı, karar verme biriminin kural tabanında da kullanılan bilgileri aldığı veri tabanı (data base) ve denetim amaçlarına uygun dilsel denetim kurallarının bulunduğu kural tabanı (rule base) olmak üzere iki kısma ayrılabilir (Aydoğmuş, 2009). Genel olarak da uygulama dönemindeki bilgilerden ve denetim amaçlarından oluşur. Bilgi tabanından dilsel denetim kurallarının tanımlanmasında ve bulanık mantık denetimindeki bulanık bilgi işleme süresince yararlanılır. Kurallar kümesi denetimin amaçlarını, sürecini ve stratejisini belirler. Denetimi yapılan sistemle ilgili, bulanıklaştırma (fuzzification), bulanık çıkarım, durulaştırma (Defuzzification) işlemleri sırasında gerek

duyulan üyelik işlevi ve kural çizelgesi bilgileri veri tabanından (data base) kullanıma sunulur (Elmas, 2007).

Yapılan çalışmada asenkron motor tahrikli hidrolik pompa ile çalışan standart hidrolik pres makinesi incelenmiş ve sistem basıncı üzerinde oluşabilecek değişiklikleri olabildiğince minimum seviyelere çekerek sistemin daha optimum bir şekilde bulanık mantık denetleyici kullanılarak çalıştırılması hedeflenmiştir. Hidrolik pres makinelerinde optimum iş yapılabilmesi için sistem basıncının her bir çevrimde sabit kalması gerekmektedir. Basıncın çok küçükte olsa sabit kalmama nedenleri arasında sistemdeki ısı kayıpları, basıncın oluştuğu bölümlerdeki mekanik kayıplar, sistem basıncının ölçüldüğü transmitterin ölçüm hassasiyeti yada PLC'den gerekli analog sinyalin gönderildiği basınç oransal valflerinin çalışma hassasiyetleri gösterilebilir. Uygulama üzerinde PLC'nin BM modülünü kullanarak ilgili parametre ayarları ile modül aktif edilip PLC içerisine yazılan yazılımla bu işlem gerçekleştirilebileceği gibi, BM modülünü kullanmadan PLC içerisinde BM kontrol modellemeleri yaparak da daha kompleks bir yazılım ile basınç kontrolü sağlanabilir. BM kontrol modelleme tercih edilmesinin avantajları; genel kontrol algoritması, hızlı tepki vermesi ve en optimum karar alınması olarak sıralanabilir (Karakuzu, 2013).



Şekil 2. Bulanık mantık kontrol temel yapısı Figure 2. Fuzzy logic control basic structure

Çalışmada, hidrolik derin çekme pres makinesinin mekanik aksamı tasarlandıktan sonra Şekil 3'de gösterilen elektrik panosunda yer alan PLC içerisinde bulanık mantık kontrol yazılımı geliştirilmiştir. Makine üzerindeki hidrolik güç ünitesinde hidrolik blok yer almaktadır. Bu hidrolik blok üzerinde yer alan ve bulunduğu hattın basıncını ölçen basınç transmitterinden alınan analog sinyal, PLC içerisinde yazılan bulanık mantık kontrol ile işlenmiştir. İşlenen bu sinyal daha hızlı ve daha kararlı bir şekilde analog bir sinyale dönüştürülerek blok hattına basıncı sağlayan oransal valf kartına verilmiştir. Böylece kapalı çevrim bulanık mantık kontrol sistemi amaçlanmıştır. Kapalı çevrim bulanık mantık kontrol sisteminde, klasik sistemdeki basınç kontrolüne göre daha hassas ve sistem basıncının olması gereken stabil değerleri, operatörün panelden girerek istemiş olduğu sistem basınç değerlerine daha yakınlık göstermiştir. PLC, girişinden okumuş olduğu analog sinyali kendi içerisindeki yazılımla çıkışına daha kararlı bir şekilde aktardığı gözlemlenmiştir. Böylece ortaya çıkacak ürünün daha düzgün olması için gerekli basınç ve tonaj değeri ne ise sistem daha kararlı sağlamıştır. Sistemin istenen basıncı birebir aynı değeri verememesi, basınç verici (transmitter) ve oransal valf kartının ölçüm hassasiyetlerinden ve sistemdeki kayıplardan kaynaklanmaktadır.

577



Şekil 3. Hidrolik pres elektrik kontrol panosu Figure 3. Hydraulic press electrical control board

Şekil 4'de bulanık mantık kontrol algoritmalarının yürütüldüğü PLC tabanlı bulanık kontrol sistemi blok şeması görülmektedir. Input-1 (I1) sistemin basıncı (Koç Tabla Basıncı)'nı ölçen ve çıkışında analog bir sinyal veren basınç verici, Output-1 (O1) ise girişine gelen analog sinyale göre basıncın uygulanmasını sağlayan basınç oransal valf ve kontrol kartını göstermektedir.



**Şekil 4.** PLC tabanlı bulanık kontrol sistemi Figure 4. PLC based fuzzy control system

Sistem operatör HMI ekranından çalıştırıldıktan sonra pres makinesi yapması gereken işlevi gerçekleştirirken I1 basınç sensöründen okunan analog sinyal PLC'de bir dizi içerisinde kaydedilir. PLC'de yer alan BM kontrollü program devreye girer. Şekil 5'de blok diyagramları verilen Min-Max yöntemi ile okunan basınç değerlerinin minimum ve maksimumları tespit edilmiştir.

PLC analog modül çıkışına verilecek olan sinyalin minimum ve maksimumları yine Şekil 5'te gösterildiği gibi program tarafından tespit edilir. Tespit edilen çıkış değerleri program içerisinde Şekil 6'da gösterildiği gibi ağırlık ortalaması fonksiyonuna tabi tutularak çıkışa verilmesi gereken en uygun çıkış yüzdesi bulunur. Şekil 7'de bulunan çıkış yüzdesi değerine göre oransal valf kartına ne kadarlık bir analog sinyal uygulanması gerektiğine PLC karar verir.





# HİDROLİK PRES MAKİNELERİNDE ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMASI (INDUSTRY 4.0 APPLICATION IN HYDRAULIC PRESS MACHINES)

Klasik hidrolik sistemler ile servo tahrikli hidrolik sistemleri karşılaştırmak üzere iki farklı preste hidrolik üniteler birim zamanda yapılan iş ve enerji sarfiyatı ölçümü için çalıştırılmıştır. Birim zamanda çıkan iş parçası sayısı, harcanan güç, oluşan gürültü, yağ sıcaklığı ölçümleri yapılarak, elde edilen verilere göre verimlilik hesapları yapılmıştır. Servo motor tahrikli değişken hızlı pompa ile çalışan hidrolik güç ünitesi ile yüksek enerji tasarrufu, verimlilik sayesinde, hidrolik sistemin güç tüketiminde %13,98, ortam gürültüsünde %6 düşüş elde edilmiş, %18'lik daha fazla üretim yapılabileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca daha az sıcaklık girdisinden dolayı da hidrolik sistemin çalışma ömrünün artması da beklenmektedir. Böylece Endüstri 4.0'a uygun bir şekilde sistem hassasiyeti arttırılmış olup ve yüksek bir enerji tasarrufu sağlanmıştır. Servo motorlu sistemin klasik sisteme göre daha düşük desibel seviyelerinde çalışması sağlanmıştır.



Şekil 6. PLC içinde ağırlık ortalaması ile durulaştırma bloğuFigure 6. Defuzzification with weight mean in PLC

Her iki sisteme de Endüstri 4.0'ın en önemli uygulamalarından biri olan RFID teknolojisi entegre edilebilir durumdadır. Böylece makine Endüstri 4.0'a uygun bir şekilde kendi kendine algılama, karar verebilme, ve gerekli doneleri yazılan yazılımla kendi içerisinde sağlayabilmektedir.

Endüstri 4.0'ın en önemli uygulamalarından biri olan RFID teknolojisi radyo frekanslarıyla çalışan elektronik olarak tanımlama sistemleridir. Bu sistemlerin okuma-yazma kafası ve etiket olarak iki önemli bileşeni vardır. Böylece preste şekillendirilecek ürünün cinsi, karakteristiği ne olursa olsun etiket (tag) adını verdiğimiz sistem bileşenleriyle okuma-yazma kafasından okunan ürün bilgisi sistemdeki PLC'ye tanıtılarak ürünün veya kalıbın şekillendirilmesi için gerekli olan basınç ve tonaj değerleri yazılım sayesinde hesaplanabilir duruma getirilmektedir. Böylece makine endüstri 4.0'a uygun bir şekilde kendi kendine algılama, karar verebilme ve gerekli doneleri yazılan yazılımla kendi içerisinde sağlayabilmektedir.

Endüstri 4.0'ın en önemli bileşenlerinden biri de IO-Link'tir. IO-Link otomatik olarak sensörleri parametrelerle ifade etme, tesis durumlarının tanısı ve değerlerin ölçümünde kayıpları önleyerek aktarma görevi bulunan noktadan noktaya dağıtılan seri iletişim protokolüdür. Böylece daha kolay ve daha hızlı iletişim kurmak için ve global olarak tercih edilen bir çözüm yolu olmuştur. Pres makinesi üzerindeki hidrolik güç ünitesinde yer alan bazı elektronik cihazlar IO-Link özellikli seçildiğinde, operatörün kullanacağı endüstriyel akıllı tablet pc ekranına yüklenen özel parametrelendirme arayüz

programları sayesinde parametre ayarları yapılabilir duruma gelmektedir. Böylece, IO-Link özellikli cihazlar olması sebebiyle hataların olabildiğince minimize edilmesi, sistemde algılanan verinin çok daha hızlı bir şekilde işlenerek sinyal olarak aktarılması söz konusudur.



Şekil 7. PLC içinde bulanık mantık kontrol çıkışı Figure 7. Fuzzy logic control output in PLC

Elektrik motorunun üzerine yerleştirilebilir durumda olan titreşim-sıcaklık sensörü sayesinde motor, mekanik arızalardan ve bundan dolayı oluşabilecek can ve mal kayıpları, diğer arıza gibi süreçlerden korunabilir durumdadır. Kestirimci-Bakımcılık sayesinde motorun anlık olarak mekanik durumu ve sıcaklığıyla alakalı bilgiler alınıp işlenebilir durumdadır. Sensörün ayarlanan değerlerine yakın değerlerde, sensör ilgili çıkışlarını üreterek operatöre alarm verebilir durumdadır. Böylece sistem tehlikelere karşı korunmuş olacaktır. Ayrıca makine de beklenmeyen ve istenmeyen durumlar yaşanmayıp ciddi iş potansiyel kaybı ve mali kayıpların önüne geçilmiş durumdadır. Bu durumda Endüstri 4.0 için önem arz etmektedir. Sonuç olarak klasik hidrolik sistemlerin yerini artık Endüstri 4.0'a uygun servo tahrikli hidrolik sistemlerin alacağı görülmektedir.

#### DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Çalışmada, deneylerin yapılabilmesi için öncelikle özel bir firma tarafından üretilen, boyut ve kullanılan malzeme bakımından aynı özelliklere sahip iki adet hidrolik pres makinesinden yararlanılmıştır. Aynı şekilde bu pres makineleri için üretilen, ve şaselerin üst kısmına montaj edilen iki adet hidrolik güç ünitesi denemeler için kullanılmıştır. Kullanılan hidrolik güç ünitelerinde, pompalar ve onları tahrik edici motorlar, servo motor ve asenkron motor olarak birbirinden farklıdır. Ayrıca

pompalar, sabit debili ve değişken debili pompa olarak kullanılmış olup hidrolik güç ünitesinin diğer kullanılan malzemeleri ve boyutları aynıdır. Her iki sisteminde çalıştırılması için ihtiyaç duyduğu elektrik tesisatı oluşturulup panoları yapılmıştır. Gerekli kontroller yapılıp makineler devreye alındıktan sonra her iki sistemde deneylerin yapılmasına hazır hale gelmişlerdir.

Deneye başlamadan önce ilk olarak Çizelge 1'de görüldüğü gibi koç ve pot tablalarının her iki makinede hızlı iniş, presleme ve sıvama aşamalarındaki toplam katetmesi gereken mesafeler endüstriyel PC üzerinden sisteme yüklenmiştir. Burada hedef, tablaları aynı mesafede çalıştırarak zaman kaybı olmadan aynı süreleri elde edip bu süreler içerisinde tükettikleri enerji miktarlarını tespit etmektir. Yine aynı çizelgede dikkat edileceği gibi koç ve pot tablalarının basınç değerleri ve makinelerin toplam çalışma iş adetleri aynı tutulup, tabla mesafelerinde olduğu gibi Endüstriyel PC üzerinden sisteme yüklenmiştir. Böylece her iki sistemde de makinelerin aynı işi yapması için gerekli olan tüm donanım aynı tutulmuş olup geriye sadece motor farklılığından ortaya çıkacak olan enerji tüketim farklılıkları gözlemlenmiştir.

Enerji tasarrufunun gözlenmesiyle alakalı testler yapılırken her iki sistem arasında birim çevrim sürelerinde çok fazla bir fark gözlenmemiştir. Fakat yapılan her bir çevrim sürelerine karşılık bir malzeme çıkmakta olup, makine günlük haftalık vb. testlere tabi tutulduğunda enerji konusunda Çizelge 2'de görüldüğü gibi %13,98 oranında bir enerji tasarrufu elde edilmiştir. Değişken debili sistemde, pres makinasının ihtiyaç duyduğu anlarda gerekli debi ve basıncı üretmek için servo motor devreye girmektedir. Değişken debili sistem pres makinasının boşta bekleme sürelerinde motor tarafında enerji tüketimini sıfıra düşürmektedir. Bu durum makinanın uzun yıllar kullanılacağı göz önünde bulundurulursa ciddi maddi kayıpların önüne geçmektedir.

Koç ve Pot Tablalarının Almış Olduğu Yol Mesafeleri			
Koç Tabla Hızlı İniş Mesafesi	200 mm		
Koç Tabla Presleme Mesafesi	80 mm		
Koç ve Pot Tabla Sıvama Mesafesi	80 mm		
Koç Tabla Alınan Toplam Mesafe	360 mm		
Test Süreleri			
Birim İş Adedi Boyunca Geçen Süre	18.8-18.9 sn		
Malzemeyi Alma ve Yerleştirme Süresi	11.38 – 11.49 sn		
Test Boyunca Geçen Toplam Süre	20 dk		
Koç ve Pot Tablalarının Sıvama Esnasındaki Basınç Değerleri ve Toplam İş Adedi			
Koç Tablasının Basınç Değeri	40 – 42 Bar		
Pot Tablasının Basınç Değeri	101 Bar		
Toplam İş Adedi	40 Adet		

**Çizelge 1.** İki farklı hidrolik pres için ortak test parametreleri **Table 1.** *Common test parameters for two different hydrolic presses* 

**Çizelge 2.** İki Farklı Hidrolik Pres İçin Harcanan Enerji Değerleri **Table 2.** EnergyConsumption Values For Two Different Hydraulic Presses

Enerji Ölçüm Değerleri	Bulanık Kontrollü	Servo Tahrikli
	Sabit Debili Pres	Değişken Debili Pres
Test Bitiminde Elde Edilen Son Değer	361,3 kWh	153,8 kWh
Teste Başlamadan Önceki İlk Değer	323,4 kWh	121,2 kWh
İki Değer Arasında Elde Edilen Fark	37,9 kWh	32,6 kWh
Birim İş Adedi Boyunca Harcanan Enerji	0,948 kWh/Adet	0,815 kWh/Adet

Her iki sistemin gürültü seviyesinin zamana bağlı ölçüm değerleri Çizelge 3'te verilmektedir. Her iki makine için ses ve gürültü seviyesi ölçümleri, ölçüm cihazıyla makinanın ön ve arka taraflarından makinaya 1 metre mesafeden 20 saniye boyunca yapılmıştır. Böylece; her iki sisteminde bir iş çevrimi

süresi boyunca kaç dB ses seviyesinde çalıştığı zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen değerlerden anlaşılacağı gibi ses ve gürültü seviyelerinde %6 gibi bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu test makinalarının, bulunduğu ortamdan daha yalıtılmış bir ortamda diğer ortam gürültülerinden arındırılmış bir şekilde ses ve gürültü seviyesi testleri yapılmış olsaydı daha farklı sonuçlar alınabilirdi. Ayrıca, her iki pres için tablaların çalışma aşamalarındaki almış olduğu mesafeler aynı tutulup tablaların işlem hızları endüstriyel PC aracılığıyla Çizelge 4 ve Çizelge 5'de verildiği gibi kaydedilmiştir.

	Bulanık Kontroll	ü Sabit Debili Pres	Servo Tahrikli Değ	çişken Debili Pres
Zaman	Ön Taraf	Arka Taraf	Ön Taraf Ölçümü	Arka Taraf
(sn)	Ölçümü (dB)	Ölçümü (dB)	(dB)	Ölçümü (dB)
1.	73,50	78,60	69,09	73,88
2.	72,90	77,10	68,53	72,47
3.	69,60	73,70	65,42	69,28
4.	69,20	74,10	65,05	69,65
5.	70,00	73,60	65,80	69,18
6.	68,80	73,40	64,67	69,00
7.	70,50	73,90	66,27	69,47
8.	72,50	74,10	68,15	69,65
9.	70,50	75,50	66,27	70,97
10.	71,00	75,00	66,74	70,5
11.	71,50	75,30	67,21	70,78
12.	70,50	75,70	66,27	71,16
13.	70,90	74,10	66,65	69,65
14.	68,90	73,60	64,77	69,18
15.	76,90	79,80	72,29	75,01
16.	75,40	80,20	70,88	75,39
17.	70,40	76,00	66,18	71,44
18.	69,70	72,90	65,52	68,53
19.	68,90	72,20	64,77	67,87
20.	65,00	74,50	61,10	70,03
Maksimum	76,90	80,20	72,29	75,39

**Çizelge 3.** Bulanık kontrollü sabit debili pres ve servo tahrikli değişken debili pres için gürültü ölçümleri **Table 3.** Noise Measurements for Fuzzy Controlled Constant Flow Press and Servo Driven Variable Flow Press

Servo motorun sürücü üzerinden hız ve tork gibi kazanç değer parametreleri, sistemin gözle görülür daha sağlıklı çalışması durumu için denenerek gerekli değere set edilmiştir. Tablaların çalışma hızındaki verimliliği gözlemlendiğinde aynı işi değişken debili sistem 15,4 saniye gibi bir çevrim süresinde yaparken, klasik sistem ise 18,8-18,9 saniye gibi bir çevrim süresinde yerine getirmektedir. Değişken debili sistem verilere göre %18 oranında daha hızlı ve kararlı çalıştığı gözlemlenmiştir. Servo motorun sistemde ani kalkışlarda zorlu yük durumlarına daha çabuk adapte olduğu ve motorda yığılma olmadan gerekli torku üretmesi, gereken devri çok daha kısa bir sürede alması çalışma hızındaki verimliliğe etkisi olduğu görülmektedir.

Koç ve Pot Tablalarının Almış	1.Deneme	2.Deneme	3.Deneme
Olduğu Yol Mesafeleri			
Koç Tabla Hızlı İniş Mesafesi	200 mm	200 mm	200 mm
Koç Tabla Presleme Mesafesi	80 mm	80 mm	80 mm
Koç ve Pot Tabla Sıvama Mesafesi	80 mm	80 mm	80 mm
Koç Tabla Alınan Toplam Mesafe	360 mm	360 mm	360 mm
Koç ve Pot Tablalarının Hız			
Değerleri			
Koç Tabla Aşağıya İniş Hızı	130 mm/sn	130 mm/sn	130 mm/sn
Koç Tabla Presleme Hızı	16 mm/sn	16 mm/sn	16 mm/sn
Koç Tabla Yukarıya Çıkış Hızı	200 mm/sn	200 mm/sn	200 mm/sn
Pot Tabla Yukarıya Çıkış Hızı	42 mm/sn	42 mm/sn	42 mm/sn
Sıvama esnasında Koç Tabla Basıncı	29 Bar	37 Bar	45 Bar
Sıvama esnasında Pot Tabla Basıncı	73 Bar	91 Bar	125 Bar
Birim Çevrim Süresi	18.8 sn.	18.8 sn.	18.9 sn.

**Çizelge 4.** Bulanık kontrollü sabit debili pres için çalışma hızı verimliliği test verileri **Table 4.** Working speed efficiency test data for fuzzy controlled constant flow press

**Çizelge 5.** Servo tahrikli değişken debili pres için çalışma hızı verimliliği test verileri **Table 5.** Working speed efficiency test data for servo driven variable flow press

Koç ve Pot Tablalarının Almış	1.Deneme	2.Deneme	3.Deneme
Olduğu Yol Mesafeleri			
Koç Tabla Hızlı İniş Mesafesi	200 mm	200 mm	200 mm
Koç Tabla Presleme Mesafesi	80 mm	80 mm	80 mm
Koç ve Pot Tabla Sıvama Mesafesi	80 mm	80 mm	80 mm
Koç Tabla Alınan Toplam Mesafe	360 mm	360 mm	360 mm
Koç ve Pot Tablalarının Hız			
Değerleri			
Koç Tabla Aşağıya İniş Hızı	160 mm/sn	160 mm/sn	160 mm/sn
Koç Tabla Presleme Hızı	20 mm/sn	20 mm/sn	20 mm/sn
Koç Tabla Yukarıya Çıkış Hızı	250 mm/sn	250 mm/sn	250 mm/sn
Pot Tabla Yukarıya Çıkış Hızı	50 mm/sn	50 mm/sn	50 mm/sn
Sıvama esnasında Koç Tabla Basıncı	22 Bar	35 Bar	43 Bar
Sıvama esnasında Pot Tabla Basıncı	50 Bar	82 Bar	103 Bar
Birim Çevrim Süresi	15.4 sn.	15.4 sn.	15.4 sn.

#### SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, sanayi uygulamalarında kullanılan sabit ve değişken debili pres makineleri için gereken mühendislik hesaplamalarının ve ARGE süreçlerinin yapılmasından sonra en optimum şekilde makinelerin üretimi sağlanmaya çalışılmıştır. Ayrıca bulanık mantık kontrol algoritmaları ile basınç kontrol döngüleri iyileştirilmeye çalışılmıştır.

Çalışma sonunda; bulanık mantık denetleyici, PLC içerisine Min-Max çıkarım yöntemi, ağırlık ortalaması yöntemine göre gerçekleştirilen durulaştırma, çıkış yüzdesinin elde edildiği yazılım ile entegre edilmiştir. Eklenen bu yazılım ile sistem basıncının daha optimum sonuçlar ile kontrolünün yapılması sağlanmıştır. Ayrıca, endüstri 4.0 teknolojilerinden olan RFID, IO-LİNK, Titreşim-Sıcaklık Sensörü gibi özel uygulamalar Hidrolik Pres Makinelerine uygulanarak sisteme esneklik ve avantaj sağlanmıştır. Geliştirilen servo tahrikli sistem ile klasik hidrolik pres arasında enerji verimliliği, ses (gürültü) seviyesi verimliliği ve çalışma hızındaki verimlilikler çeşitli test ve analizler yapılarak ortaya konulmuş, servo sistemin klasik sisteme göre farklılıkları ön plana çıkarılmıştır. Yapılan bu test ve

analizler sonucunda enerji tasarrufunda %13.98, ses (gürültü) azaltımında %6, çalışma hızında %18 oranında verimlilik elde edildiği çizelgelerde anlatılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan ve anlatılan yöntemlerin birçok hidrolik sisteme uyarlanabileceği görülmektedir. Elde edilen sonuçlardan yapılan çalışmanın, diğer çalışmalara temel olabileceğini, bulunan sonuçların geliştirmeye açık olduğunu, anlatılan özelliklerin benzer çalışmalara ve literatüre ışık tutacağını söylemek mümkündür.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Altaş, İ.H., 1999, "Bulanık Mantık: Bulanıklılık Kavramı", Enerji Elektrik Elektromekanik-3e, Temmuz 1999, Sayı 62, 80-85 s, Bilesim Yayıncılık A. Ş.
- Aydoğmuş, Z., 2009, "Implementation Of A BM-Based Level Control Using SCADA", Expert Systems With Applications 36 pp. 6593–6597.
- Bostan B. 2011, VI. Ulusal hidrolik pnömatik kongresi ve sergisi (HPKON) "Değişken hızlı pompa tahrik sistemleri ".
- Da Ruan and van der Wal, A., 1998, "Controlling The Power Output Of A Nuclear Reactor with Fuzzy Logic", Information Sciences 110, pp.151-177.
- Elmas, Ç., 2007, "Yapay Zeka Uygulamaları", Seçkin Yayıncılık, 230-257 s.
- Karakuzu, C. ve Öztürk, S., 2013, "PLC İle BM Tabanlı Hata Düzeltmeli Üç Fazlı Motor Hız Kontrolü" emo.org.tr>ekler/f0442558302a6ed\_ek.pdf..
- Kaynak, Okyay ve Armağan, Gülçin, 1993, "Bulanık Denetim ve Endüstriyel Uygulamaları", Tübitak Marmara Araştırma Merkezi, 29 Ocak 1993.
- Kılıç, K. ve Tanrıkulu Z., 2017, "Yönetim Bilişim Sistemleri Yüksek Lisans Dersi", İÜ FBE Enformatik Ana Bilim Dalı.
- Özçalık, H. R., Türk, A., Yıldız, C., Koca, Z., 2008, "Katı Yakıtlı Buhar Kazanında Yakma Fanının BM Denetleyici İle Kontrolü", KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi, 11(1).
- Özdemir, M. T. ve Orhan, A., 2012, "An Experimental System For Electrical And Mechanical Education: Micro Hydro Power Plant Prototype", Procedia - Social and Behavioral Sciences 47, pp. 2114 – 2119.
- Saad, N. and Arrofiq, M., 2011, "A PLC-Based Modified-Fuzzy Controller For PWM Driven induction Motor Drive With Constant V/Hz Ratio Control", Robotics and Computer-Integrated manufacturing 28, pp. 95–112, 2012.
- Selek, A., 2017, "Endüstri Tarihine Kısa Bir Yolculuk", Endüstri 4.0 Platformu, http://www.endustri40.com/ adresinden alındı.
- Sinecen, M. ve Özek, A., 2002, "Klima Sistem Kontrolünün Bulanık Mantık İle Modellenmesi", PAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 06 Eylül 2002.
- Yılmaz, S., Cakir B., Gedik, A., Dinçer, H., 1999, "Speed Control Of A Conveyor System By Means Of Fuzzy Control Aided PLC", IEEE, ISIE'99 ~ Bled, Slovenia, pp. 1328-1332.
- Zadeh, A. Lotfi, 1971, "On Fuzzy Algorihtms", Electron. Res. Lab., Univ. California, Berkeley, Memo. M-325.



# ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ FV SİSTEMDE MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİP ALGORİTMALARININ DEĞİŞKEN HAVA ŞARTLARI ALTINDA KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

# <sup>1</sup>Fuad ALHAJ OMAR, <sup>2</sup>Göksel GÖKKUŞ, <sup>3</sup>Ahmet Afşin KULAKSIZ

<sup>1</sup>Selçuk Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, TÜRKİYE <sup>2</sup>Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir, TÜRKİYE <sup>3</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE <sup>1</sup>fuad.omar@selcuk.edu.tr, <sup>2</sup>gokselgokkus@nevsehir.edu.tr, <sup>3</sup>aakulaksiz@ktun.edu.tr

# (Geliş/Received: 21.01.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 27.02.2019)

**ÖZ**: Güneş enerjisi en uygun alternatif enerji kaynağıdır; buna ek olarak güneş enerjisi teknolojilerinin uygulanması, elektrik enerjisi taleplerini güvenceye almanın yanı sıra çevre kirliliği ve elektrik üretim maliyetlerini de azaltabilir. Bu çalışmada, maksimum güç noktası takip (MGNT) sistemlerinde kullanılan üç algoritmanın değerlendirilmesi ele alınmaktadır. Bunlar sırası ile Değiştir ve Gözetle (D&G), Artımlı İletkenlik (Aİ) ve Bulanık Mantık (BM) tabanlı algoritmalardır. Bu algoritmalar basitliği ve gerçekleştirme kolaylığı nedeniyle MGNT'de en çok kullanılanlar olarak kabul edilirler. Algoritmalar Matlab/Simulink ortamında tasarlanmış ve üç algoritmanın matematik modelleri çeşitli hava koşullarında test edilmiştir. Benzetimler sonunda bu üç algoritma içerisinden bulanık mantık algoritmasının diğerlerine oranla daha fazla enerji sağlayabildiği, daha az salınım yaptığı ve değişken hava koşulları altında daha hızlı yanıt verdiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Artımlı iletkenlik, Bulanık mantık, Değiştir & Gözetle, Fotovoltaik, MGNT

# Comparative Analysis of Maximum Power Point Tracking Algorithms under Various Weather Conditions for Standalone PV System

**ABSTRACT:** Solar energy is the most viable alternative source; furthermore, the implementation of solar energy technologies can reduce the problems of environmental pollution and electricity production costs besides securing the demands of electrical power. This research addresses the evaluation of three algorithms used in maximum power point tracking systems (MPPT). These algorithms are Perturbation & Observation (P&O), Incremental Conductance (IC) and Fuzzy Logic (FL). They are considered as the most used in MPPT due to their simplicity and ease of realization. Based on Matlab/Simulink environment, the mathematical models of the three algorithms are designed and tested under various weather conditions. Collected simulation results illustrated the effectiveness of Fuzzy logic algorithm to draw more energy, decrease oscillation and provide a fast response under variable weather condition. The final simulation results show the fuzzy logic algorithm exhibits a better performance compared to both perturbation & observation and incremental conductance algorithms.

*Key Words:* Incremental conductance, Fuzzy logic, Perturbation & Observation, Photovoltaic, MPPT

# **GİRİŞ** (INTRODUCTION)

Enerji üretimi için fosil yakıtlara olan bağımlılığın devam etmesi, atmosferik değişimlere yol açan karbon emisyonlarındaki artışa yol açmaktadır. Ayrıca, küresel anlamda enerji kullanımının sürekli

olarak artması, petrol ve doğal gaz tüketimine olan talebi artırmaktadır. Buna karşın, yenilenebilir enerji kaynakları temiz olmaları, atık üretmemeleri ve tüketilemez olmaları sebebiyle fosil kaynaklı yakıtlara ve doğal gaza alternatif niteliğindedir. Tüm yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en fazla dikkat çeken enerji kaynağı, uygulama kolaylığı ve düşük maliyeti bakımından güneş enerjisi olmuştur. Güneş enerjisi teknolojilerindeki ilerlemelere rağmen halen güneş pillerinin enerji dönüşüm verimliliği düşüktür. Güneş panellerinin doğrusal olmayan karakteristik eğrisi, güneş ışınım seviyesine ve ortam sıcaklığına bağlı olarak değiştiğinden bazı dezavantajlara sahiptir (Fig. 1) (S. Mulel ve diğ., 2016). Güneş pillerinin verimliliğini artırmak ve güneş pillerinden elde edilen gücü optimize etmek için, Değiştir ve Gözetle (D&G), Artımlı İletkenlik (Aİ) ve Bulanık Mantık (BM) gibi birçok maksimum güç noktası takip tekniği önerilmiştir. Maksimum güç noktası (MGN), Şekil 1'de belirtilen güneş paneli akım-gerilim (I-V) eğrisi üzerindeki mümkün olan en yüksek güç çıkışına karşılık gelen (Pmax) noktadır ve maksimum güç noktası izleyicisi: Değişken hava koşulları altında sürekli olarak maksimum güç noktasını bulmaya çalışan donanımsal bileşendir (P. Takun ve diğ., 2017). Bu bağlamda, bahsedilen üç tekniğin performansını değerlendirmek için birçok araştırma yapılmıştır. Bulanık mantık kontrol tekniğinin, değişken sıcaklık ve değişken güneş ışımaları altında bile maksimum gücü elde edebilen ve daha iyi bir maksimum güç noktası takip başarısına sahip olduğu görülmüştür (Y.Yi Hong ve diğ., 2011). Ek olarak, bulanık kontrol tekniği, güneş paneli dizilerinin dönüşüm verimliliğini arttırmaktadır (R. Mahalakshmi ve diğ., 2014). Bulanık mantık kontrol tekniğinin, maksimum güç çıkışını korumak için yüksek kararlılık ve dönüşüm verimi sergilediği de ortaya çıkmıştır (Ch. Yan Chuang ve ark., 2017). Şekil 2'de bir maksimum güç noktası izleyicinin fotovoltaik (FV) sisteme uygulanmasına dair blok şeması gösterilmiştir.



**Şekil 1.** Günel paneli P-V ve I-V karakteristik eğrileri *Figure 1. P-V & I-V characteristics of a solar panel* 

Bu çalışmada, bahsedilen üç maksimum güç noktası takip algoritmasının performansını değerlendirmek için bir simülasyon ortamı oluşturulmuştur. Performans değerlendirmesi için D&G, Aİ ve BM algoritmalarının matematiksel modelleri Matlab/Simulink'te tasarlanmıştır. Simülasyon sonuçları farklı ışınım ve sıcaklık seviyeleri altında elde edilmiştir.



**Şekil 2**. Bir FV sistemde MGNT'ine dair blok şeması *Figure 2*. *Typical diagram of MPPT in a PV System* 

#### MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİP TEKNİKLERİ (MAXIMUM POWER POINT TRACKING TECHNIQUES)

#### Değiştir & Gözetle (Perturbation & Observation)

Bu tekniğin çalışması, görev döngüsünün değiştirilmesine ve çıkış gücünün gözetlenmesine dayanır. İlk olarak, görev döngüsündeki değişiklik pozitif ise ve güçte meydana gelen değişiklik de pozitif ise, bu durum çalışma noktasının maksimum güç noktasının solunda olacağı ve bir sonraki değişimin pozitif yönde olacağı anlamına gelir. Tersi durumda, eğer güçteki değişim negatif ise, işletim noktasının güneş paneli maksimum güç noktası eğrisinin sağında olacağı ve bir sonraki değişimin negatif olacağı anlamına gelir. Görev döngüsündeki değişiklik negatif ise ve güçteki değişiklik pozitif ise, bu durum çalışma noktasının güneş paneli maksimum güç noktası eğrisinin sağında olacağı ve bir sonraki değişimin negatif olacağı anlamına gelir. Öte yandan, görev döngüsündeki değişimin negatif olması ve güçteki değişimin negatif olması durumunda, çalışma noktasının maksimum güç noktasının solunda olacağı ve bir sonraki değişimin pozitif olacağı anlamına gelir (N. Karamia ve ark., 2017). D&G algoritmasının temel ilkesi Çizelge 1'de özetlenmiştir.

Değişim	Güç Değişimi	Sonraki değişim	
pozitif	pozitif	pozitif	
pozitif	negatif	negatif	
negatif	pozitif	negatif	
negatif	negatif	pozitif	

**Çizelge 1.** D&G algoritmasının temel ilkesi *Table 1. The basic principle of the P&O algorithm* 

#### Artımlı İletkenlik (Incremental Conductance)

D&G yöntemine göre daha kararlı çalışma sağladığı için tercih edilen bu teknik, iletkenlik artışı (dI/dV) değerinin ani iletkenlik (-I/V) değeriyle karşılaştırılmasına dayanır. A. Safari ve ark., (2011) tarafından verildiği gibi maksimum güç noktasının yeri, dI/dV ile -I/V arasındaki ilişki kullanılarak şu şekilde belirlenir:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}, MGN'de$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}, MGN'nin solunda$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}, MGN'nin sağında$$
(1)

Güneş paneli gerilimi ve güneş paneli akımının farklı zamanlarda ölçülmesi ile hesaplanan iletkenlik değerlerinin her bir örnekleme periyodunda karşılaştırılması yoluyla maksimum güç noktasına ulaşılması Şekil 3'te görülmektedir. D&G yöntemine göre daha karmaşık hesaplama gerektirmesine karşın MGN etrafındaki salınımların azaltılabildiği belirtilmiştir.

#### Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)

Genellikle bulanık mantık kontrolü üç aşamadan oluşur: bulanıklaştırma (fuzzification), kural tabanı tablo araması ve durulaştırma (defuzzification) (M. Kumar ve diğerleri, 2015). Bulanıklaştırma aşamasında, Şekil 4'te görüldüğü gibi bir üyelik fonksiyonuna dayanarak, sayısal giriş değişkenleri dilsel değişkenlere dönüştürülür. Burada kullanılan beş bulanık seviye: Negatif Büyük (NB), Negatif Küçük (NS), Sıfır (ZE), Pozitif Küçük (PS) ve Pozitif Büyük (PB)'tür.



Şekil 4. Bulanık mantık algoritmasının girdileri ve çıktıları için önerilen üyelik fonsiyonu Figure 4. The proposed membership function for inputs and output of fuzzy logic algorithm

Sayısal değişken

Daha yüksek doğruluk için yedi seviyeli bulanık mantık denetleyicisi kullanılabilir. Şekil 4'te a & b, sayısal değişken değerlerinin aralığını temsil eder. Genellikle, bir MGNT bulanık mantık denetleyicisine yapılan girişler bir E hatası ve  $\Delta$ E hatasında bir değişiklik meydana getirir. Kullanıcı, E ve  $\Delta$ E'nin nasıl hesaplanacağını seçme esnekliğine sahiptir.

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)}$$
(2)

$$\Delta E = E(n) - E(n-1) \tag{3}$$

E ve  $\Delta E$  hesaplamaları yapıldıktan sonra dilsel değişkenlere dönüştürülecek, bunun sonucunda bulanık mantık denetleyici çıkışı, güç dönüştürücünün görev döngüsü  $\Delta D$ 'yi değiştirecektir. Önerilen kural tabanı Çizelge 2'de görülmektedir.

	=.				
AE E	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

**Çizelge 2.** Önerilen bulanık mantık kural tabanı tablosu *Table 2. The proposed fuzzy logic rule base* 

E ve  $\Delta$ E'nin farklı kombinasyonları için görev döngüsündeki  $\Delta$ D değişimi, kullanılan güç dönüştürücüsüne ve kullanıcının bilgisine göre belirlenir. Durulaştırma aşamasında, bulanık mantık denetleyicisinin çıkışı olan dilsel değişkenler, Şekil 4'te önerilen üyelik fonksiyonuna bağlı olarak sayısal değişkenlere dönüştürülür. Bu ise güç dönüştürücüsünü maksimum güç noktasına yaklaştıracak olan bir analog sinyal üretir.

#### SİSTEM MODELİ (MODEL OF THE SYSTEM)

FV hücrenin genel matematiksel denklemine dayanarak, güneş paneli modeli Matlab/Simulink'te oluşturulmuştur. Güneş paneli I-V ve P-V özellikleri üç durumda elde edilebilir. İlk durum, değişken ışınım seviyelerinde ve sabit sıcaklık altında (Şekil 5), ikinci durum, değişken sıcaklık seviyelerinde ve sabit ışıma altındadır (Şekil 6). Üçüncü durum ise değişken ışıma ve değişken sıcaklık altında (Şekil 7) elde edilmiştir.







**Şekil 6.** Değişken sıcaklık altında güneş paneline ait I-V ve P-V karakteristiği *Figure 6.* I-V and P-V characteristic of the modeled PV panel under variable temperature levels



**Şekil 7.** Değişken güneş ışıması ve değişken sıcaklık altında güneş paneline ait I-V ve P-V karakteristiği *Figure 7. I-V and P-V characteristic of the modeled PV panel under variable temperature and variable irradiance levels* 

Güneş ışınımı ve sıcaklığının farklı seviyelerde 5 saniye boyunca uygulanması sonucu elde edilen grafikler sırası ile Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir.



Modellenen güneş panelinin belirtilen üç durum altında, maksimum çıkış gücü sırasıyla Çizelge 3, 4 ve 5'te gösterilmiştir.

**Çizelge 3.** Değişken güneş ışıması altında maksimum güç noktası değerleri *Table 3. The MPP values according to the variable irradiance levels* 

	0	
Işıma Seviyesi	Sıcaklık Seviyesi	Elde Edilen Maksimum Güç
800 W/m <sup>2</sup>	25 °C	33 W
$1100 \text{ W/m}^2$	25 °C	46 W
$1200 \text{ W/m}^2$	25 °C	50 W
$1000 \text{ W/m}^2$	25 °C	41 W
$900 \text{ W/m}^2$	25 °C	38 W

**Çizelge 4.** Değişken sıcaklık seviyeleri altında maksimum güç noktası değerleri *Table 4. The MPP values according to the variable temperature levels* 

Işıma Seviyesi	Sıcaklık Seviyesi	Elde Edilen Maksimum Güç
1000 W/m <sup>2</sup>	25 °C	41 W
1000 W/m <sup>2</sup>	35 °C	38 W
1000 W/m <sup>2</sup>	45 °C	34 W

1000 0, 170 1011 1 00000	<b>Tuble 5.</b> The 1411 Tourises according to the outmote influence and temperature levels				
Işıma Seviyesi	Sıcaklık Seviyesi	Elde Edilen Maksimum Güç			
$800 \text{ W/m}^2$	25 °C	32 W			
$1100 \text{ W/m}^2$	25 °C	46 W			
$1200 \text{ W/m}^2$	35 °C	46 W			
$1000 \text{ W/m}^2$	45 °C	33 W			
$900 \text{ W/m}^2$	45 °C	31 W			

**Çizelge 5.** Değişken ışıma ve değişken sıcaklık değerleri altında maksimum güç noktası değerleri *Table 5. The MPP values according to the variable irradiance and temperature levels* 

Simülasyonda bir DA-DA yükselten dönüştürücü kullanılmıştır. Anahtarlama elemanlarının görev döngüsünün kontrol edilmesiyle, güneş paneli uç gerilimi maksimum gücün elde edildiği noktada tutulacak ve aynı zamanda dönüştürücü çıkış gerilimi istenen yük gerilimine eşitlenecektir. Kullanılan dönüştürücünün giriş-çıkış denklemi:

$$Vpv = Vo(1 - D) \tag{4}$$

Burada; V<sub>Pv</sub> güneş panelinin çıkış gerilimi, Vo yükselten dönüştürücünün çıkış gerilimi ve D görev döngüsünü ifade eder (S. Soltani ve diğ., 2017). Önerilen sistem MATLAB / Simulink kullanılarak modellenmiş ve simüle edilmiştir. Önerilen Simulink modeli Şekil 10'da görülmektedir. Simülasyon çalışmasında, üç MGNT tekniği simüle edilmiş ve bahsedilen üç durum altında değerlendirilmiştir.



**Şekil 10.** Önerilen sistemin blok şeması *Figure 10. Diagram of the proposed system* 

### SİMÜLASYON SONUÇLARI VE TARTIŞMA (SIMULATION RESULTS AND VALIDATION DISCUSSIONS)

Maksimum güç noktası takip tekniklerini değerlendirmek ve analiz etmek amacıyla her algoritma için Matlab/Simulink'te bir çevrimdışı simülasyon test edilmiştir.

Bahsedilen üç durumda, her algoritmayı ayrı olarak kullanarak FV panelinden çekilen güç, zamana göre çizilmiştir (Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13).



**Şekil 12.** Aİ algoritması ile kontrol edilen FV panel çıkış gücü grafikleri *Figure 12. Output power of solar panel with IC algorithm* 

Elde edilen simülasyon sonuçları, test edilen tüm algoritmaların, ışıma ve sıcaklıktaki anlık değişime rağmen maksimum güç noktasını bulup izleyebildiğini gösterir. BM algoritması çalışma noktasını tam olarak maksimum güç noktasına getirmiştir. Buna karşın diğer algoritmalardan D&G ve Aİ'nin sistemi maksimum güç noktasına yakın bir yerde takip ettiği görülmüştür. Bu üç durumda da BM algoritması kullanılarak güneş panelinden çekilen enerjinin, Çizelge 6'da gösterildiği gibi, diğer algoritmalardan üretilen enerjiden daha büyük olduğu görülmektedir. Şekil 11 ve Şekil 12'de D&G ve Aİ algoritmaları iyi bir dinamik performans gösterir, fakat maksimum güç noktası takibinde kararlı durumda daha büyük salınımlar gösterir, bu da maksimum güç noktası takip doğruluğunu düşürür. Şekil 13'te simülasyon sonuçları, azami güç noktasında sabit durum salınımının, BM algoritmasını kullanırken daha az olduğunu, daha düşük enerji kaybı ve artan sistem verimliliği ile sonuçlandığını göstermektedir.



**Şekil 13.** BM algoritması ile kontrol edilen FV panel çıkış gücü grafikleri *Figure 13.* Output power of solar panel with FL algorithm

	Işıma seviyesi	Sıcaklık seviyesi	D&G ile elde edilen güç	Aİ ile elde edilen güç	BM ile elde edilen güç
İlk durum	800 W/m <sup>2</sup>	25 °C	31.5 W	32 W	33 W
	$1100 \text{ W/m}^2$	25 °C	45 W	45 W	46 W
	$1200 \text{ W/m}^2$	25 °C	49 W	50 W	50 W
	$1000 \text{ W/m}^2$	25 °C	40 W	41 W	41 W
	$900 \text{ W/m}^2$	25 °C	36 W	37 W	38 W
_	Işıma seviyesi	Sıcaklık seviyesi	D&G ile elde edilen güc	Aİ ile elde edilen güç	BM ile elde edilen güc
İkinci durum	1000 W/m <sup>2</sup>	25 °C	40 W	41 W	41 W
	1000 W/m <sup>2</sup>	35 °C	37 W	37 W	38 W
	$1000 \text{ W/m}^2$	45 °C	32.5 W	33 W	34 W
	Işıma seviyesi	Sıcaklık seviyesi	D&G ile elde edilen güç	Aİ ile elde edilen güç	BM ile elde edilen güç
	800 W/m <sup>2</sup>	25 °C	31 W	31 W	32 W
Üçüncü durum	$1100 \text{ W/m}^2$	25 °C	45 W	45 W	46 W
	$1200 \text{ W/m}^2$	35 °C	45 W	45 W	46 W
	$1000 \text{ W/m}^2$	45 °C	32 W	33 W	33 W
	900 W/m <sup>2</sup>	45 °C	30 W	30 W	31 W

**Çizelge 6.** Her bir algoritmanın ayrı ayrı uygulanması ile elde edilen güç tablosu *Table 6. The obtained power by using each algorithm* 

Sonuç olarak, güneş panellerinden güç üretiminin optimize edilmesi amacıyla oluşturulan modelde, Bulanık Mantık tekniğinin, verim açısından diğer tekniklere göre (D&G ve Aİ) üstün performans gösterdiği kanıtlanmıştır.

#### SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, maksimum güç noktası takip sisteminde kullanılan değiştir ve gözetle, artımlı iletkenlik ve bulanık mantık yöntemlerinin performans karşılaştırması ve değerlendirmesi sunulmuştur. Üç adet maksimum güç noktası takip tekniğinin performansını doğrulamak için, algoritma modelleri Matlab/Simulink'te oluşturulmuş ve simülasyon sonuçları toplanmıştır. Bulanık mantık tekniğinin daha iyi takip başarısına sahip olduğu, değişken ışınım ve değişken sıcaklık altında bile maksimum güç elde edebileceği gösterilmiştir. Bu nedenle bulanık mantık teknikleri, geleneksel tekniklere kıyasla daha çok tercih edilebilir. Ayrıca bulanık mantık algoritması maksimum güç noktasında kararlı durumdaki salınımların ve güç kayıplarının azalmasını sağlar.

İlerleyen çalışmalar, STMicroelectronics-32 bit ARM kullanılarak bulanık mantık algoritmasının uygulanmasına yönelik olacak ve gerçek bir fotovoltaik sistemde test edilecektir. Fotovoltaik güç üretim sisteminin verimini arttırmak için bulanık mantık tabanlı algoritmanın doğruluğunu ve etkililiğini göstermek üzere deneysel sonuçlar elde edilecektir.

#### **TEŞEKKÜR** (ACKNOWLEDGEMENT)

17401144 numaralı projeye sağlamış olduğu destekten dolayı, Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederiz.

#### **KAYNAKLAR** (REFERENCES)

- S. Mulel, R. Hardas, and N. Kulkarni, "P&O, IncCon and Fuzzy Logic Implemented MPPT Scheme for PV Systems using PIC18F452," *in IEEE WiSPNET Conference*, 2016.
- P. Takun, S. Kaitwanidvilai, and C. Jettanasen, "Maximum Power Point Tracking using Fuzzy Logic Control for Photovoltaic Systems," in *International Multi conference of Engineers and Computer Scientists, Vol II, Hong Kong, March* 2011.
- Y.Yi Hong, "Real-Time Simulation of Maximum Power Point Tracking Control U sing Fuzzy Logic for Stand Alone PV System" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017.
- R. Mahalakshmi, A. Kumar, "Design of Fuzzy Logic Based Maximum Power Point Tracking Controller for Solar Array for Cloudy Weather Conditions." *IEEE Towards Sustainable Energy*, 2014.
- Ch. Yan Chuang, P. Syun Chen, "Novel maximum power point tracker for PV systems using interval type-2 fuzzy logic controller," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017.
- N. Karamia, N. Moubayedb, and R. Outbibc, "General review and classification of different MPPT Techniques," in Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 1–18, 2017.
- A. Safari and S. Mekhilef, "Simulation and Hardware Implementation of Incremental Conductance MPPT with Direct Control Method Using Cuk Converter," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 4, April 2011.
- M. Kumar, S. Kapoor, R. Nagar, and A. Verma, "Comparison between IC and Fuzzy Logic MPPT Algorithm Based Solar PV System using Boost Converter," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 4, Issue 6, June 2015.*
- S. Soltani, and M. Kouhanjani. "Fuzzy Logic Type-2 Controller Design for MPPT in Photovoltaic System," 22nd Electrical Power Distribution Conference, April 2017.



# KALİKSAREN TÜREVİ İMMOBİLİZE EDİLMİŞ MERRIFIELD REÇİNESİ İLE KAPLI QCM SENSÖRÜNDE SULU ORTAMDA p-NİTROFENOL ALGILANMASI

# <sup>1</sup>Egemen ÖZÇELİK, <sup>2</sup>Farabi TEMEL, <sup>3</sup>Mustafa TABAKCI

<sup>1,2,3</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE
<sup>1</sup>egemen.ozcelik@gmail.com, <sup>2</sup>ftemel@ktun.edu.tr, <sup>3</sup>mtabakci@ktun.edu.tr

## (Geliş/Received:19.01.2019; Kabul/Accepted in Revised Form:27.02.2019)

**ÖZ**: Bu çalışma, kaliksaren hidrazin amit türevi içeren Merrifield reçinesi (KIMR) ile modifiye edilmiş bir QCM sensörün sulu ortamdaki *p*-nitrofenol (PNF) için algılama çalışmalarını açıklamaktadır. Bu amaçla öncelikle KIMR hazırlanarak yapısı karakterize edildi ve daha sonra QCM kristal yüzeyine kaplandı. Elde edilen KIMR modifiyeli sensörün PNF algılama çalışmaları, PNF için iyi bir algılama gösterdiğini ortaya çıkardı. Böylece sulu ortamda farklı konsantrasyon ve farklı pH'larda algılama çalışmaları gerçekleştirildi. Sonuçlardan limit algılama değerinin 0,34 mM olduğu ve en iyi algılamanın pH 10 da gerçekleştiği anlaşıldı. Ayrıca Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon izotermlerinden KIMR'nin adsorpsiyon kapasitesi, 372 mg/g olarak hesaplandı.

Anahtar Kelimeler: Adsorption, Kaliksaren, Kuartz kristal mikrobalans, p-Nitrofenol, Sensör

# Sensing of p-Nitrophenol in Aqueous Media on QCM Sensor Coated with Calixarene Derivative Immobilized Merrifield Resin

**ABSTRACT:** This study describes the sensing studies of QCM sensor which modified with calixarene hydrazine amide derivative immobilized Merrifield resin (CIMR) for the *p*-nitrophenol (PNP) sensing in aqueous media. For this aim, first CIMR was prepared and its structure was characterized, and then it was coated onto the QCM crystal surface. The PNP sensing studies of CIMR modified QCM sensor revealed good results for PNP sensing. Thus, it was performed the sensing studies at different concentration and pHs in aqueous media. From the results, it was found that the limit of detection was 0.34 mM and optimum pH value was 10 for PNF sensing by CIMR modified QCM sensor. Moreover, it was calculated the adsorption capacity of CIMR as 372 mg/g from the Langmuir and Freundlich isotherm models.

### Key Words: Adsorption, Calixarene, Quartz Crystal Microbalance, p-Nitrophenol, Sensor

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstrinin gelişmesi birçok avantajı beraberinde getirirken, bunun yanında kirlilik oluşturması gibi dezavantajlara da sahiptir. Organik kirleticilerin varlığı ve toksik etkileri, yüzey ve yer altı sularının kirlenmesinde, bitki, hayvan ve insan hayatını etkileyecek düzeyde kirlilik kaynağı oluşturmaktadır. Organik kirleticiler arasında; fenolik malzemeler ve türevleri, atık sularda bulunan kirleticilerden önemli kirleticilerdir. Bu malzemeler, farmasötik, petrokimya ve kimyasal üretim proseslerinde kullanılmaktadırlar. Fenolik hidrokarbonların oluşturduğu kirliliğin giderilmesi için farklı metotlar geliştirilmiştir. Bu amaçla, kimyasal oksidasyon, ekstraksiyon, adsorpsiyon gibi giderme yöntemleri kullanılmıştır (Lai ve diğ, 2014; Yu ve diğ, 2010; Dolaksız ve diğ, 2017).

Atık sularda kirliliği gidermeden önce, kirliliğin hangi boyutlarda olduğunu belirlemek için kantitatif analiz yapılması gerekmektedir. Bu amaçla sensör teknolojilerinin kullanımı ön plana

çıkmaktadır. Bilinen sensör teknolojileri arasında, Kuartz Kristal Mikrobalans (Quartz Crystal Microbalance – QCM) teknolojisi, kütle hassasiyeti olan piezoelektrik temelli bir sensör çeşididir. Nanogram seviyesinde algılamaya izin veren bu sensör teknolojisi, kristal yüzeyinde meydana gelen kütle değişimini Sauerbrey denklemi sayesinde (Sauerbrey, 1959) frekans değişimine dönüştürerek analiz yapılmasına izin verir.

QCM ölçüm tekniği, algılayıcı molekülün farklı analitlere karşı algılama özelliklerinin incelenmesinde kullanılan tekniklerden biridir. Adsorpsiyon işlemi, algılayıcı molekülün analit ile etkileşmesiyle yüzeyde meydana gelen frekans değişiminin belirlenmesi prensibine dayanır. Adsorpsiyon işlemine bağlı olarak meydana gelen kütle değişimi, moleküller arası veya molekül içi iyon–proton değişiminden kaynaklanabilmektedir.

Sensör uygulamalarında, algılayıcı moleküller olarak polimerler ve makromoleküller kullanılmaktadır. Bunlardan birisi de *p*-ter-bütilfenol ve formaldehitin bazik ortamda kondenzasyon reaksiyonu sonucunda oluşan halkalı yapıdaki "kaliksaren" molekülleridir. Türevlendirilebilme yeteneği sınırsız olan bu moleküller, farklı fonksiyonel gruplar ile türevlendirilerek host-guest etkileşimlerinin incelenebilmesine olanak tanımaktadırlar (Temel ve diğ., 2017).

Bu çalışmada ise hidrazinamit fonksiyonel grubu içeren bir kaliksaren türevi, Merrifield reçinesine immobilize edilerek polimerik bir yapı (KIMR) elde edilmiş ve bu yapı sulu ortamlarda *p*-nitrofenol (PNF) algılanması için sıvı temaslı QCM sisteminde algılayıcı yüzey olarak kullanılmıştır. Böylece önemli bir organik kirletici olan PNF'nin KIMR kaplanmış QCM yüzeyinde algılanma çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

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

#### Kimyasallar ve Cihazlar (Chemicals and Instrumentations)

Sentezlenen moleküllerin erime noktasının belirlenmesi için Ez-Melt aparatı kullanıldı. Varian marka 400 MHz NMR Spektrometresi, Perkin Elmer marka 100 FTIR spektrometresi ve Leco marka CHNS-932 Anaylzer Elementel Analiz cihazı ile sentezlenen yapılar karakterize edildi. Sentezler sırasında, Merck marka Kieselgel 60 F<sub>254</sub> ince tabaka kromatografisi kullanılarak sentezler takip edildi. Çalışma sırasında kullanılan tüm malzemeler ve reaktifler analitik kalitede olup Merck ya da Sigma Aldrich firmasından tedarik edildi.

QCM sensör çalışmalarını gerçekleştirmek için Stanford Research System (California, ABD) marka QCM200 cihazı kullanıldı. QCM sisteminde 5 MHz temel frekans değerine sahip altın elektrotlu kuvars kristaller kullanıldı. QCM kristallerinin temizlenmesi için, ISOLAB marka ultrasonik banyo kullanıldı. Tüm çalışmalar Labconco-5220120 glove box ünitesi içerisinde gerçekleştirildi.

# Algılayıcı Molekülün Sentezi ve Merrifield Reçinesine İmmobilizasyonu (Synthesis of Sensing Molecules and İmmobilization on Merrifield Resin)

Algılayıcı malzeme olarak kullanılacak kaliks[4]aren türevi, literatürde belirtildiği gibi sentezlendi (Gutsche ve Iqbal, 1990; Collins ve diğ., 1991; Maity ve diğ, 2011). Sentezlenen algılayıcı molekülün Merrifield reçinesine immobilizasyonu için literatürdeki bilinen yöntem uygulanarak aşağıda verildi. Sentez şeması ise Şekil 1'de gösterildi.



Şekil 1. Kaliksaren hidrazin amit türevinin sentez şeması ve Merrifield reçinesine immobilizasyonu (i) formaldehit, NaOH, difenileter; (ii) metilbromoasetat, K2CO3, aseton; (iii) hidrazin hidrat, kloroform-metanol (1:3); (iv) Merrifield reçinesi, NaI, K2CO3, kuru aseton

**Figure 1.** Synthesis of calixarene hydrazine amide derivative and its immobilization on Merrifield resin (i) formaldehyde, NaOH, diphenyl ether; (ii) methylbromoacetate, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, acetone; (iii) hydrazine hydrate, chloroform-methanol (1:3); (iv) Merrifield resin, NaI, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, dry acetone

Merrifield reçinesi (0,0252g, 0,0504 mmol), potasyum karbonat (0,375 g), sodyum iyodür (0,75 g), ve 0,4 g 4 nolu bileşik (0,504 mmol) kuru aseton (50 mL) içerisinde 48 saat boyunca geri soğutucu altında kaynatıldı. Süresi tamamlandıktan sonra karışım süzülür ve üzerinden aseton ile yıkandı, ardından çözücü vakum altında kuruluğa kadar uzaklaştırıldı. Diklorometan içerisinde çözülen katı madde, HCl ile ekstrakte edilip, asitliği giderildi. Organik faz ayrıldı, kurutuldu ve çözücüsü uzaklaştırılarak KIMR elde edildi. (Memon ve diğ, 2006). IR: 3316 cm<sup>-1</sup> (N-H), 1689 cm<sup>-1</sup> (C=O), 1047 cm<sup>-1</sup> (C-O).

#### Modifiye QCM Sensörlerinin Hazırlanması (Preparation of Modified QCM Sensors)

QCM kristallerinin yüzeyi modifiye edilmeden önce, kristaller ultrasonik banyo içerisinde kloroform ile yıkandı, saf su ve aseton ile yüzeyi temizlendi, ultra saf azot gazı ile kurutuldu. Temizlendikten sonra, QCM kristali modifiye edilmeden önce temel frekansı kaydedildi.

KIMR maddesinin 1,0 mM olacak şekilde kloroform içerisinde çözeltisi hazırlandı. Hazırlanan çözelti damlatma yöntemiyle QCM kristalinin yüzeyine damlatılarak, çözücünün uçması beklendi. Çözücüsü tamamen uzaklaştıktan sonra, frekans değeri kaydedilerek, kaplama öncesi ve sonrasındaki fark hesaplanarak kaplama miktarı belirlendi.

#### p-Nitrofenol (PNF) Algılama Çalışmaları (Sensing Studies of p-Nitrophenol)

Buradaki QCM sisteminin çalışma prensibi daha önceki çalışmada verilmiştir (Temel ve Tabakci, 2016). Çalışmalarda kullanılan sıvı temaslı ölçüm sistemi ise Şekil 2'de görülmektedir. Buna göre, öncelikle modifiye QCM kristalleri, QCM akış hücresine yerleştirildi. Ardından peristaltik pompa yardımı ile sistemden saf su geçirilerek sistemin kararlı hale gelmesi sağlandı. Daha sonra, PNP çözeltisi sisteme verildi ve gerçekleşen adsorpsiyon sonucundaki frekans değişimi kaydedildi. Adsorpsiyon

tamamlandıktan sonra, sisteme yeniden saf su verildi ve bu kez de desorpsiyon sonucundaki frekans değerinin başlangıç değerine gelmesi beklendi.



**Şekil 2**. Sıvı temaslı ölçüm sisteminin gösterimi *Figure 2. Presentation of liquid contact measuring system* 

#### BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

#### Sentez ve Karakterizasyon (Synthesis and Characterization)

Kaliksarenler, farklı analit molekülleri ile kompleks yapabilme özelliklerine sahip makrosiklik yapıdaki bileşiklerdir ve sensör çalışmalarında algılayıcı molekül olarak kullanılabilmektedirler. Sensör çalışmalarında, algılayıcı moleküller ile analit arasındaki etkileşim dolayısıyla gerçekleşen algılama ölçülerek malzemenin algılama özelliği belirlenmektedir (Temel, 2013). Bu çalışmada ise hedef algılayıcı moleküle ulaşmak için öncelikle *p*-ter-bütilkaliks[4]aren türevleri(**1-4**), literatür metoduna göre sentezlenmiş ve karakterizasyonları yapılmıştır (Gutsche ve Iqbal, 1990; Maity ve diğ, 2011; Memon ve diğ, 2006). Daha sonra **4** no'lu bileşiğin Merrifield reçinesi üzerine immobilizasyonu ile KIMR polimerik yapısı elde edilmiştir. Hazırlanan KIMR için FT-IR ile karakterizasyon işlemi yapılmış ve ilgili spektrum Şekil 3'te verilmiştir. Bilindiği gibi 698 cm<sup>-1</sup> da görülen pik Merrifield yapısına ait olan C-Cl bağına aittir. Dolayısıyla KIMR'nin FT-IR spektrumu incelendiğinde Merrifield'a ait 698 cm<sup>-1</sup>'deki bu pikin kaybolduğu, C-O için 1047 cm<sup>-1</sup>, C=O için 1689 cm<sup>-1</sup> ve N-H için 3316 cm<sup>-1</sup> piklerin oluştuğu görülmüştür. Böylece immbolizasyon işleminin gerçekleştiği doğrulanmıştır.



**Şekil 3.** Merrifield reçinesi, 4 no'lu bileşik ve KIMR için FTIR Spektrumları *Figure 3.* FTIR spectra for Merrifield resin, compound 4 and KIMR

#### Modifiye QCM Kristallerinin Hazırlanması ve Sulu Ortam Algılama Çalışmaları

Hazırlanan polimerik KIMR maddesi, QCM kristalleri yüzeyine damlatma metodu kullanılarak kaplanarak KIMR modifiyeli bir QCM sensör edilmiştir. QCM sensörün modifiye edilmeden önce ve sonraki frekans değerleri arasındaki fark ya da QCM kristali üzerindeki kaplamanın frekans değeri 780 Hz olarak hesaplanmıştır. KIMR modifiyeli QCM sensörü daha sonra Şekil 2'de gösterilen QCM sistemindeki akış hücresine yerleştirilerek sulu ortamda PNF algılama çalışmaları için kullanılmıştır.

#### p-Nitrofenol algılama çalışması (Sensing studies of p-Nitrophenol )

KIMR modifiyeli QCM sensörünün 10<sup>-2</sup> M PNF çözeltisine karşı frekans değişimi, Şekil 4'te verilmiştir. Frekans değişimi incelendiğinde, PNF çözeltisini algılama sonrasında, adsorpsiyon sürecinin tamamlandıktan sonra, ortama saf su verilerek desorpsiyon işleminin gerçekleştiği ve bu sayede QCM sensörünün yüzeyinde analit kalmadığı ve bir sonraki çalışma için uygun olduğu görülmüştür. Bilindiği gibi bir sensörün, analit ve algılayıcı molekülleri arasındaki stokiyometrik oranı hesaplanabilmektedir. Stokiyometrik oran, bir mol algılayıcı molekülün kaç mol analit tuttuğunu belirlemek için kullanılan bir parametredir. Literatürde (Temel ve diğ, 2017) belirtildiği gibi hesaplanan stokiyometrik oran bu çalışma için 0,296 olarak bulunmuştur.



Şekil 4. PNF (10<sup>-2</sup> M)'ye karşı KIMR modifiyeli QCM sensörünün frekans değişimi Figure 4. Frequency change of KIMR modified QCM sensor towards 10<sup>-2</sup> M PNF

#### Konsantrasyon çalışması (Concentration study)

KIMR kaplı QCM sensörlerinin farklı konsantrasyondaki PNF çözeltilerine karşı sulu ortamda algılama çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Buna göre 10<sup>-3</sup> – 10<sup>-2</sup> M aralığındaki farklı PNF çözeltilerinin algılama sonucundaki frekans değişimi ve regresyon grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'teki sonuçlara göre, PNF çözeltisinin konsantrasyonu arttıkça sensör tepkisinin de giderek arttığı görülmüştür. Regresyon grafiğine göre, R<sup>2</sup> değeri 0,9996 olarak ortaya çıkmıştır. Limit algılama değeri ise literatürdeki gibi hesaplanarak (Temel ve diğ, 2017) 0,34 mM olarak bulunmuştur.



Şekil 5. Farklı konsantrasyonlardaki PNF çözeltilerine karşı KIMR modifiye QCM sensörünün frekans değişimi Figure 5. Frequency change of KIMR modified QCM sensor towards different concentration of PNF

#### pH çalışması (pH study)

Bilindiği gibi amino grubu içeren maddelerin pH'a bağlı olarak adsorpsiyon özellikleri değişmektedir (Korpayev ve diğ, 2018). Bu nedenle, algılama sırasında ortamın pH değeri algılama özelliklerini değiştirebilmektedir. Bu nedenle algılama çalışmalarında pH değerinin etkisi incelenmiştir. Buna göre pH değeri 2-10 arasında değişen PNF çözeltilerine karşı frekans değişim değerleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Farklı pH değerlerindeki PNF çözeltilerine karşı KIMR modifiye QCM sensörünün frekans değişimi Figure 6. Frequency change of KIMR modified QCM sensor towards PNF solutions at different pH

#### Adsorpsiyon izotermleri (Adsorption isotherms)

Farklı PNF başlangıç konsantrasyon çalışması sonuçlarından faydalanılarak Langmuir ve Freundlich izotermleri çizilerek Şekil 7 ve 8'de gösterilmiştir. Şekil 7'deki Langmuir izoterminden polimerin adsorpsiyon kapasitesi  $q_0 = 372$  mg PNF/g adsorban, b = 0,013 L/mmol olarak hesaplanmıştır. Burada b değerinin büyük olması, adsorbanın adsorplama yeteneğinin, düşük konsantrasyon aralığında iyi olduğunu göstermektedir. Özellikle tek tabakalı adsorpsiyonun meydana geldiği heterojen adsorpsiyon sistemlerinde bu izoterm denge durumunu net olarak açıklayamaz. Adsorpsiyonun elverişliliğini bulmak için boyutsuz R<sub>L</sub> (dağılma) sabiti aşağıdaki gibi hesaplanır ve bu sabitin 0 ile 1 arasında değerler alması elverişlilik durumunu sağlandığına işaret eder. Burada R<sub>L</sub> değerinin 0,883 olarak bulunması adsorpsiyonun Langmuir'e elverişli olduğunu göstermektedir.



Şekil 8'deki Freundlich izoterminden k = 0,045 ve n = 1,05 olarak hesaplanmıştır. Freundlich izoterminin doğrusallığa yaklaşması, adsorpsiyonun Freundlich izotermine de uyduğunu göstermektedir. Adsorpsiyon izotermlerine ait değerler, Çizelge 1'de verilmiştir.



Figure 8. Freundlich isotherm

]	T <b>ablo 1.</b> Langmuir ve Freundlich izoterm r	nodel sabitleri ve katsayılar
Т	able 1. Langmuir and Freundlich isotherm model co	nstants and correlation coefficients

Langmuir				Freundlich		
<b>q₀ (mg/g)</b>	b (L/mmol)	<b>R</b> <sup>2</sup>	RL	Kf (mg/g)	n	<b>R</b> <sup>2</sup>
372,22	0,0132	0,9990	0 <r1<1< td=""><td>0,0447</td><td>1.0495</td><td>0,9999</td></r1<1<>	0,0447	1.0495	0,9999

#### SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada; hidrazin amit fonksiyonlu kaliks[4]arenin Merrifield reçinesine immobilize edilmesiyle polimerik yapı (KIMR) hazırlandı ve karakterizasyonu gerçekleştirildi. Daha sonra ise hazırlanan KIMR'nin oldukça toksik olan *p*-nitrofenol (PNF) kirleticisine karşı adsorpsiyon özellikleri QCM metodu ile belirlendi. Bu amaçla KIMR modifiyeli bir QCM sensör hazırlanarak sulu ortamda PNF'ye karşı algılama özellikleri incelendi. Elde edilen sonuçlardan KIMR modifiyeli sensörün PNF'ye karşı iyi bir algılama gösterdiği, limit algılama değerinin 0,34 mM olduğu ve KIMR adsorpsiyon kapasitesinin 372 mg/g olduğu belirlendi. Böylece farklı polimerik kaliksaren türevleri hazırlayarak QCM yüzeyine kaplama yönteminin farklı algılama çalışmaları için de gerçekleştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Collins, E., M., McKervey, M. A., Madigan, E., Moran, M, B., Owens, M., Ferguson, G., Harris, S. J., 1991, "Chemically Modified Calix[4]arenes. Regioselective Synthesis of 1,3-(distal) Derivatives and Related Compounds. X-Ray Crystal Structure of a Diphenol-dinitrile", *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 1*, Vol. 12, pp. 3137 – 3142.
- Dolaksiz, Ekin., Y., Temel, F., Tabakci, M., 2018, "Adsorption of Phenolic Compounds onto Calix[4]arene-bonded Silica Gels from Aqueous Solutions", *Reactive and Functional Polymers*, Vol. 126, pp. 27 – 35.
- Gutsche, C. D., Iqbal, M., 1990, " p-tert-BUTYLCALIX[4]ARENE", Organic Syntheses, Vol. 68, pp. 234 237.
- Korpayev, S., Kavaklı, C., Tilki, S., Akkaş Kavaklı, P., 2018, "Novel Cotton Fabric Adsorbent for Efficient As(V) Adsorption", *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 25, pp.34610 34622.
- Lai,, B., Zhang, Y., Chen, Z., Yang, P., Zhou, Y., Wang, J., 2014, "Removal of p-nitrophenol (PNP) in Aqueous Solution by the Micron-Scale Iron-Copper (Fe/Cu) Bimetallic Particles", *Appl Catal B Environ*, Vol. 144, pp. 816 – 830.
- Maity, D., Chakraborty, A., Gunupuru, R., Paul, P., 2011, "Calix[4]arene based Molecular Sensors with Pyrene as Fluoregenic Unit: Effect of Solvent in Ion Selectivity and Colorimetric Detection of Flüoride", *Inorganica Chimica Acta*, Vol. 372, pp. 126 – 135.
- Memon, S., Tabakci, M., Roundhill D. M., Yilmaz, M. 2006, "Synthesis and Evaluation of the Cr(VI) Extraction Ability of Amino/nitrile calix[4]arene Immobilized onto a Polymeric Backbone", *Reactive & Functional Polymer*, Vol. 66, pp. 1342 – 1349.
- Sauerbrey, G., 1959, "Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung" Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei,. Vol. 155 no.2, pp. 206 222.
- Temel, F., 2013, Farklı Yapılardaki Kaliksaren Türevlerinin Gaz Algılama Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Temel, F., Ozcelik, E., Ture, A. G., Tabakci, M., 2017, "Sensing Abilities of Functionalized calix[4]arene Coated QCM Sensors Towards Volatile Organic Compounds in Aqueous Media", Applied Surface Science, Vol. 412, pp. 238 – 251.
- Temel, F., Tabakci, M., 2016, "Calix[4]arene Coated QCM Sensors for Detection of VOC Emission: Methylene Chloride Sensing Studies", *Talanta*, Vol. 153, pp. 221 – 227.
- Yu, P., Huang, K., Zhao, J., Zhang, C., Xie, K., Deng, F., Liu, H. 2010, "A Novel Seperation Technique: Gas-Assisted Three-Liquid-Phase Extraction for Treatment of The Phenolic Wastewater" Sep Purif Technol, Vol. 75, pp. 16 – 322.



# ÖSTEMPERLEME SICAKLIK VE SÜRESİNİN ÖSTEMPERLENMİŞ SÜNEK DÖKME DEMİRLERİN MİKRO YAPI VE SERTLİĞİNE ETKİSİ

# <sup>1</sup>Emre ÖZTÜRK, <sup>2</sup>Mehmet YILDIRIM

<sup>1,2</sup> Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty,, Metallurgical and Materials Engineering Department, Konya, TURKEY <sup>1</sup>emre\_gsozturk@hotmail.com, <sup>2</sup>myildirim@ktun.edu.tr

# (Geliş/Received: 21.01.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 28.02.2019)

**ÖZ**: Bu çalışmada, östemperleme sıcaklık ve süresinin östemperlenmiş sünek dökme demirlerin mikro yapı ve sertliğine etkisi detaylı bir biçimde incelenmiştir. GGG-50 küresel grafitli dökme demirlere (KGGD) 950 °C' de 2 saat östenitleme ısıl işlemi uygulandıktan sonra 350 ve 320 °C sıcaklıklarda 90 ve 120 dakika süre ile östemperleme yapılmıştır. Östemperleme işleminden sonra numunelerin faz analizleri Xışınları kırınım yöntemiyle, mikroyapıları ise optik mikroskop kullanılarak, mekanik özellikleri ise Brinell sertlik testi ile incelenmiştir. Her iki sıcaklık ve sürede östemperleme işleminden sonra karakteristik ösferrit ve yüksek karbonlu östenitten oluşan östemperlenmiş sünek dökme demir mikro yapısı elde edilmiştir. Östemperleme sıcaklığı azaldıkça ve süresi arttıkça numunelerin sertliği artmıştır. Ayrıca, östemperleme süresinin artmasıyla yüksek karbonlu östenitin karbon yüzdesi de artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD), Mikroyapı, Östemperleme, Sertlik

# Effect of Austempering Temperature And Time on Microstructure and Hardness of Austempered Ductile Cast Irons (ADI)

**ABSTRACT:** In this study, the effect of austempering temperature and time on microstructures and hardness of austempered ductile iron (ADI) were investigated in detail. The GGG-50 nodular cast iron samples were austenized at 950 °C for 2h, and then austempered at 350 and 320 °C for 90 and 120 minutes in salt bath. Phase analysis of the samples were performed via X-ray diffraction analysis, microstructural examination were done by light optical microscope and mechanical properties were investigated by Brinell hardness test. After austempering heat-treatment the microstructure is characteristic austempered ductile iron microstructure composed of ausferrite and high carbon austenite. Hardness increases with decreasing austempering temperature and increasing austempering time. Moreover, the carbon content of high carbon austenite increased with increasing austempering time.

## Key Words: Nodular Cast Iron, Microstructure, Austempering, Hardness

# **GİRİŞ (INTRODUCTION)**

Küresel grafitli dökme demirler (KGDD), dökümden önce eriyik metale az miktarda Mg ve Ce gibi elementlerin ilave edilmesi ile grafitin (karbonun) küresel şekilde oluştuğu dökme demir türüdür [Spengler, ve Briggs, 1972]. Sfero dökme demir olarak ta bilinen bu dökme demir türü diğer dökme demirlere kıyasla daha yüksek mukavemet, tokluk, süneklik ve işlenebilirliği sahiptir [İzgiz, 1986; Aşkun ve diğ., 2003]. Bu üstün özelliklerinden ötürü otomotiv sanayi, makina imalat sanayi, savunma sanayi, iş makinaları, demiryolları ve tarım makinaları gibi birçok farklı sektörde geniş uygulama alanına sahiptir [Ucun ve diğ., 2007]. KGGD'lerin sahip olduğu üstün mekanik özellikler östemperleme adı verilen ısıl işlem ile daha da iyileştirilmektedir [Hasırcı, 2000]. Östemperlenmiş sünek dökme demirler sahip oldukları yüksek tokluk, yüksek aşınma ve sürünme direnci ve süneklik gibi mükemmel

mekanik özelliklerin yanı sıra düşük yoğunluk ve yüksek dayanım/ağırlık oranlarından ötürü dövme çeliklerin yerini alabilecek yeni nesil malzemelerdir [Yalçın ve Özel, 1999]. Östemperlenmiş sünek dökme demirlerin eşsiz fiziksel ve mekanik özellikleri ısıl işlem neticesinde ortaya çıkan ösferrit (beynitik iğnemsi ferrit) ve yüksek karbonlu östenitten oluşan mikro yapılarından kaynaklanmaktadır [Konca ve diğ., 2017].

Bu tip mikro yapı küresel dökme demirlerin östemperleme adı verilen ısıl işlemi neticesinde elde edilmektedir. Şekil 1'de de gösterilen östemperleme ısıl işlemi çok dikkatli bir şekilde uygulanmalı ki perlit, beynit ve martenzit oluşumu gözlemlememelidir. Dökme demirlere uygulanan östemperleme ısıl işlemi çeliklere uygulanan gibi üç basamaktan oluşmaktadır: (i) tam bir östenitik (γ) matris elde etmek için 850-1050 °C 'de yeterli sürede yapılan östenitleme, (ii) 250-400 °C arası bir sıcaklığa su verme ve (iii) su verilen sıcaklıkta 1-4 saat östemperleme işlemi. Fakat çeliklere uygulanan östemperleme işleminden farklı olarak tamamen beynitik dönüşüm istenmemektedir [Blackmore ve Harding, 1984; Keough ve Hayrynen, 2010; Tun ve Lwin, 2008; Yescas-Gonzales, 2001; Meier ve diğ., 2013,]. Östemperleme işleminde iki aşamalı faz dönüşümü meydana gelmektedir [Sadighzadeh, 2015; Gundlach ve Janowak, 1983; Voigt ve Loper, 1984; Kovacs, 1994; Sadighzadeh ve diğ., 2011; Bahmani ve diğ., 1997].

Ilk aşama:  $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma_{HC}$ Ikinci aşama:  $\gamma_{HC} \rightarrow \alpha + carbide$ 

Birinci aşamada östenit beynitik ferrit (ösferrit) ve yüksek karbonlu östenite dönüşmektedir. Bu aşamada dayanım ve tokluk en yüksek değerlerine ulaşmaktadır. Eğer birinci aşama uzun sürerse yüksek karbonlu östenit ferrit ve karbüre dönüşmektedir (ikinci aşama). İkinci aşama dönüşüm oluşan karbürlerin mekanik özelliklere olumsuz etkisinden ötürü çok istenilmemektedir. Mikro yapıda karbürlerin bulunması süneklik ve tokluğun önemli ölçüde azalmasına sebep olmakla beraber işlenebilirliği de olumsuz etkilemektedir. Birinci aşamanın sonu ile ikinci aşamanın başlangıcı arasında geçen süreye işlem penceresi (processing window) adı verilir ve en uygun mekanik özellikler bu süreçte elde edilir [Sadighzadeh, 2015].



Şekil 1. Östemperleme ısıl işlemini gösteren izotermal sıcaklık-zaman-dönüşüm diyagramı [Hayrynen ve diğ., 2002].

Figure 1. Temperature- time-transformation diagram showing austempering heat-treatment [Hayrynen ve diğ., 2002].

Ayrıca, östemperleme sıcaklık ve süresi östemperlenmiş sünek dökme demirlerin mikro yapılarını dolayısı ile de mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerdir. Östemperleme sıcaklığı nispeten yüksek (350-400 °C) seçilirse, mikro yapıdaki yüksek karbonlu östenit miktarı artar bu da yüksek süneklik ve kırılma tokluğuna, nispeten daha düşük sertlik ve dayanımın ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte daha düşük östemperleme sıcaklığı (<350 °C) seçilirse, yüksek dayanım, yüksek sertlik ve aşınma direnci fakat düşük kırılma tokluğu gözlemlenmektedir. Östemperleme süresi yüksek olursa, yukarıda bahsedilen ikinci aşama reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyon neticesinde oluşacak sert ve kırılgan

karbür parçacıkları sünekliği ve kırılma tokluğunu önemli ölçüde azaltmaktadır. Literatürde ösferrit oluşumu için 400 °C gibi çok yüksek östemperleme sıcaklığında 30 dakika ısıl işlemin yeterli olduğu, çok düşük östemperleme sıcaklıklarında (~230 °C) 4 saat ısıl işlemin en iyi mekanik özelliklerin elde edilmesinde yeterli olduğu belirtilmiştir [Rao ve Putatunda, 2003; Eric ve diğ., 2006; Sohi ve diğ., 2004; Hsu ve diğ., 2000; Kim ve diğ., 2008; Sellamuthu ve diğ., 2018]. Bu çalışma kapsamında, 350 ve 320 °C sıcaklıkta 90 ve 120 dakika östemperlenen ticari saflıktaki GGG-50 KGDD'in mikro yapısal değişiklikleri ve neticesinde malzeme sertliğine etkisi incelenmiştir.

### MALZEME VE METOT (MATERIALS and METHOD)

#### Numunelerin Üretimi (Production of the Samples)

Çalışma kapsamında Tablo 1'de verilen kimyasal kompozisyona sahip GGG-50 KGDD malzemeler kullanılmıştır. Numunelerin döküm işlemi Konya Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan Kurtsan Porya Sanayi tesislerinde yapılmıştır. Ergitme işleminde 1500 kg kapasiteli Inductotherm marka orta frekanslı indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Ocağa şarj olarak sfero piki, çelik hurdası ve sfero döndü hurdası yüklenmiştir. Ergime işleminden sonra sıvı metale döküm sıcaklığında (1450 °C) küreselleştirme ve aşılama işlemleri uygulanmıştır. Küreselleştirme işlemi tundish potasında FeSiMg7 küreselleştirici kullanılarak yapılmış olup, aşılama işlemi ise döküm potasında Fe-Si (75% Si) alaşımı kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra sıvı metal kum kalıplara dökülerek soğutulmaya bırakılmıştır. Numunelerin kimyasal analizi OBLF RS1000-162 model optik emisyon spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karbon eşdeğeri aşağıdaki eşitlik kullanılarak % 4.59 olarak hesap edilmiştir.

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \tag{1}$$

Çizelge 1. GGG-50 KGDD numuneye ait kimyasal analiz değerleri.

		Tal	b <b>le 1.</b> Chemi	cal composition	on of GGG-5	0 nodular cas	st iron specin	ien -		
Fe	С	Si	Mn	Cu	Р	S	Mg	Cr	Ni	Mo
denge	3.78	2.40	0.221	0.609	0.029	0.011	0.046	0.025	0.019	< 0.001

#### Is1l İşlem (Heat-Treatment)

Östemperleme 1sıl işlemi Ankara Sincan Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan Döksan Isıl İşlem tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Numunelere 950 °C' de 2 saat östenitleme 1sıl işlemi uygulandıktan sonra 320 ve 350 °C sıcaklıklarda 90 ve 120 dakika süre ile östemperleme yapılmıştır. Östemperleme koşullarını gösteren çizim Şekil.2' de verilmektedir. Östemperleme işlemi Petrofer AS135 1sıl işlem tuzu (50% NaNO<sub>3</sub>-50% KNO<sub>3</sub>) içeren sıcaklık kontrollü tuz banyosunda gerçekleştirilmiştir. Tuz banyosu östemperleme süresince motorlu bir mikser tarafından karıştırılmıştır. Östemperleme işlemi tamamlandıktan sonra numuneler oda sıcaklığına soğutulmaya bırakılmış ve sonrasında yüzeyindeki tuz tabakasının giderilmesi için yıkanmıştır.



**Şekil 2.** KGDD'lere uygulanan östemperleme ısıl işleminin grafiksel gösterimi. *Figure 2. Graphical represantation of austempering heat-treatment.* 

## Karakterizasyon (Characterization)

Numuneler mikro yapısal inceleme için standart metalografik numune hazırlama işlemleri kullanılarak hazırlanmıştır. Bu işlem kapsamında numuneler önce zımparalanmış, sonra 1  $\mu$ m Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile parlatılmış ve sonunda da %2 Nital çözeltisi ile dağlanmıştır. Numunelerin ısıl işlem öncesi ve sonrası mikroyapı incelemesi Nikon Eclipse MA100 model optik mikroskop kullanılarak yapılmıştır. Alaşımın faz analizi Bruker D8 Advance model X-ışını kırınım cihazı (XRD) kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler, tarama hızı 2°/dk ile 20=40-100° aralığında olacak şekilde ve dalga boyu 1.5406 Å olan Cu-K $\alpha$  ışıması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin Brinell sertlik değerleri EMCO Test DuraVision 300 model sertlik ölçme cihazı kullanılarak 182,5 kgf yük altında ve 2,5 mm bilya ile yapılmıştır. Numunelerden en az 5 farklı ölçüm alınarak ortalama sertlik değerleri hesap edilmiştir.

#### **BULGULAR** (RESULTS)

Isıl işlem görmemiş dökülmüş haldeki GGG-50 KGDD'e ait mikroyapı fotoğrafları Şekil.3'te verilmektedir. Numune mikroyapısı küresel grafitler, ferrit (beyaz renkli bölgeler) ve perlitten (koyu renkli bölge) meydana gelmektedir. Mikro yapıda herhangi bir karbüre ve döküm hatasına rastlanılmamıştır. Dökülmüş haldeki sertlik değeri ise yaklaşık 175 HB olarak ölçülmüştür.



Şekil 3. Dökülmüş haldeki GGG-50 küresel grafitli dökme demir numuneye ait mikroyapı fotoğrafları: (a) parlatılmış ve (b) dağlanmış yüzey. *Figure 3. Microstructure of as-cast GGG-50 nodular cast iron sample: (a) polished and (b) etched surface.* 

350 ve 320 °C'de 90 ve 120 dakika östemperleme işlemine maruz bırakılan numuneye ait mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.'te verilmektedir. Numunelerin tamamında östemperlenmiş sünek dökme demir mikro yapısı gözlemlenmiştir. Bu tip mikro yapı ayrıntılı incelendiğinde (Şekil 5) küresel grafitler ile birlikte koyu renkli ösferrit (beynitik veya iğnemsi (asiküler) ferrit) ve açık renkli yüksek karbonlu (kalıntı) östenit

açıkça görülmektedir. Ayrıca, östemperleme ısıl işlemi sonrasında mikro yapılarda (Şekil 4) az miktarda da olsa karbürlerin oluştuğu (beyaz renkli) gözlemlenmiştir.

Mikro yapı fotoğrafları detaylı incelendiğinde östemperleme sıcaklık ve süresinin fazların büyüklüğü, miktarı ve dağılımı gibi mikro yapısal özelliklere çok fazla etki etmediği sadece mikro yapının sıcaklığın azalmasıyla birlikte bir miktar inceldiği gözlemlenmiştir. Yüksek östemperleme sıcaklıklarında karbonun difüzyon hızı yüksek olup daha kalın morfolojide ösferrit fazı oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum Şekil 1' de verilen izotermal soğuma eğrileri de açıklanabilmektedir. Çeliklerdeki duruma çok benzer KGDD metallerde de izotermal dönüşüm (östemperleme) sıcaklığına bağlı olarak üst ve alt beynit (beynitik ferrit, ösferrit) oluşmaktadır. Nispeten daha düşük sıcaklıklarda oluşan alt beynitin sertliği, dayanımı ve kırılganlığı üst beynite göre daha yüksektir.



Şekil 4. Östemperleme ısıl işlemi uygulanmış numunelere ait mikroyapı fotoğrafları: (a) 350 °C 90 dakika, (b) 350 °C 120 dakika, (c) 320 °C 90 dakika ve (d) 320 °C 120 dakika.
Figure 4. Microstructures of austempered specimens: (a) 350 °C 90 min., (b) 350 °C 120 min., (c) 320 °C 90 min. and (d) 320 °C 120 min.



Şekil 5. 350 °C'de 90 dakika östemperleme uygulanmış numuneye ait ayrıntı mikroyapı (1000X büyütme) fotoğrafı.
Figure 5. High magnification (1000X) microstructure of austempered specimen (350 °C 90 min). Çizelge 2'de verilen Brinell sertlik sonuçlarına göre östemperleme sıcaklık ve süresinin mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediği ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlara göre östemperleme sıcaklığı azaldıkça ve östemperleme süresi arttıkça numunelerin sertliği artmıştır. Ayrıca östemperlenmiş halde ölçülen tüm sertlik değerleri dökülmüş haldeki sertlik değerine önemli ölçüde fazladır.

Numune	Brinell Sertlik Değeri
Dökülmüş	175
350 °C 90 dakika	268
350 °C 120 dakika	273
320 °C 90 dakika	302
320 °C 120 dakika	309

**Çizelge 2.** Isıl işlem şartlarına göre elde edilen ortalama sertlik değerleri. *Table 2. Mean hardness values of as-cast and austempered specimens.* 

Östemperleme süresinin artmasıyla sertlikte meydana gelen artış yüksek karbonlu östenitin karbon içeriğinin östemperleme süresinin artmasıyla doğrudan ilişkilidir. Bu ilişkiyi doğrulamak için östemperleme ısıl işlemine maruz bırakılan numunelere X-ışınları kırınım analizi uygulanmış ve elde edilen kırınım desenlerinden (Şekil 6) yüksek karbonlu östenitin kafes parametresi ve kafes parametresinden de aşağıdaki ampirik eşitlik kullanılarak östenitin karbon konsantrasyonu hesap edilmiştir [Roberts, 1953].

$$a_{\gamma} = 0.3548 + 0.0044C_{\gamma}$$

Bu eşitlikte aγ östenitin kafes parametresi (nm) ve Cγ östenitin ağırlıkça karbon yüzdesidir. Hesaplamada östenite ait (111), (220) ve (311) düzlemlerine ait Bragg açıları dikkate alınmıştır. Östenitin hesaplanan kafes parametresi ve karbon yüzdeleri Çizelge 2'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre östenitin kafes parametresi ve dolayısıyla karbon yüzdesinin östemperleme süresi ile doğru orantılı olduğu ortaya çıkmıştır. Östenitin karbon miktarındaki artış numunelerin sertliğinin artmasına sebep olmuştur.

**Çizelge 3.** Isıl işlem şartlarına göre hesap edilmiş yüksek karbonlu östenitin kafes parametresi ve karbon miktarı.

Numune	Östenit Kafes Parametresi (Å)	Östenit Karbon İçeriği (% ağ.)
350 °C 90 dakika	3,6355	1,9877
350 °C 120 dakika	3,6418	2,1309
320 °C 90 dakika	3,6435	2,1706
320 °C 120 dakika	3,6457	2,2212

**Table 3.** Calculated lattice parameter and carbon content of high carbob austenite phase of austempered specimens.

(2)



**Şekil 6.** Farklı sıcaklık ve sürelerde östemperlenmiş numunelere ait x-ışınları kırınım desenleri. *Figure 6.* X-ray diffraction patterns of austempered specimens.

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında iki farklı sıcaklıkta (350 ve 320 °C) ve iki farklı sürede (90 ve 120 dakika) östemperleme ısıl işlemine maruz bırakılan GGG-50 KGDD'in mikro yapısında meydana gelen değişiklikler ve bu değişikliklerin sertliğe etkisi incelenmiştir. Her iki sıcaklık ve sürede de ösferrit ve yüksek karbonlu östenitten oluşan östemperlenmiş küresel dökme demir mikro yapısı elde edilmiştir. Östemperleme ısıl işlemi neticesinde dökülmüş numunenin sertliği önemli ölçüde artmıştır. Östemperleme sıcaklığı azaldıkça ve östemperleme süresi arttıkça numunelerin sertliğin de artış gözlemlenmiştir. Sertlikte meydana gelen artışın sebebi sıcaklığın azalmasıyla alt beynitik bölgeye yaklaşma ve sürenin artması ile de yüksek karbonlu östenitin içindeki karbon yüzdesindeki artışa bağlıdır.

#### **KAYNAKLAR** (REFERENCES)

- Aşkun, Y., Hasırcı, H., Şeker, U., 2003, "Ni ve Cu ile Alaşımladırılmış Küresel Grafitli Dökme Demirlerin İşlenebilirliğinin Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Kaliteleri Açısından Değerlendirilmesi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Vol. 9(2), pp. 191-199.
- Bahmani, M., Elliott, R., Varahram, N., 1997, "The Austempering Kinetics and Mechanical Properties of an Austempered Cu-Ni-Mo-Mn Alloyed Ductile Iron", *Journal of Materials Science*, Vol. 32(18), pp. 4783-4791.
- Blackmore, P.A., Harding, R.A., 1984, "The Effects of Metallurgical Process Variables on the Properties of Austempered Ductile Irons", J. Heat Treat., Vol. 3, pp. 310–325.
- Eric, O., Jovanovic, M., Sidjanin, L., Rajnovic, D., Zec, S., 2006, "The Austempering Study of Alloyed Ductile Iron", *Mater. Des.* Vol. 27, pp. 617–622.
- Gundlach, R. B., Janowak, J. F., 1983, "Development of Ductile Iron for Commercial Austempering", AFS Transactions, Vol. 91, pp. 377–388.
- Hasırcı, H., 2000, Östemperlenmis Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Alasım Elementleri (Cu ve Ni) ve Östemperleme Süresinin Mikro Yapı ve MekanikÖzellikler Üzerine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Hayrynen, K. L., Brandenberg, K. R. Keuogh, J. R., 2002, "Applications of Austempered Cast Irons", AFS *Transactions*, Vol., pp. 110, 1-10.
- Hsu, C.H., Shy, Y.H., Yu, Y.H., Lee, S.C., 2000, "Effect of Austempering Heat Treatment on Fracture Toughness of Copper Alloyed Gray Iron", *Mater. Chem. Phys.* Vol., 63, pp. 75–81.
- İzgiz, S., 1986, Küresel Grafitli Dökme Demir, Segem Yayını, Ankara

Keough, J.R., Hayrynen, K.L., 2010, "Designing with Austempered Ductile Iron (ADI)", AFS Proc. 10–129.

- Kim, Y.J., Shin, H., Park, H., Lim, J.D., 2008, "Investigation into Mechanical Properties of Austempered Ductile Cast Iron (ADI) in Accordance with Austempering Temperature", *Mater. Lett.* Vol. 62, pp. 357–360.
- Konca, E., Tur, K., Koç, E.,2017, "Effects of Alloying Elements (Mo, Ni and Cu) on the Austemperability of GGG-60 Ductile Cast Iron", *Metals*, Vol. 7, 320, pp. 1-9.
- Kovacs, B. V., 1994, "On the Terminology and Structure of ADI", AFS Transactions, Vol. 102, pp. 417-420.
- Meier, L., Hofmann, M., Saal, P., Volk, W., Hoffman, H., 2013, "In-situ Measurement of Phase Transformation Kinetics in Austempered Ductile", *Mater. Charact.*, Vol. 85, pp. 124–133.
- Rao, P.P., Putatunda, S.K., 2003, "Investigations on the Fracture Toughness of Austempered Ductile Irons Austenitized at Different Temperatures", *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 349, pp. 136–149.
- Roberts, C.S., 1953, "Effect Of Carbon On The Volume Fractions And Lattice Parameters Of Retained Austenite And Martensite" *Trans AIME*, Vol.197, pp. 203-204.
- Sadighzadeh, B.A, Yazdani, S., Avishan, B., 2011, "Effect of Shot Peening Process on Fatigue Behavior of an Alloyed Austempered Ductile Iron", *China Foundry*, Vol. 8(3), pp. 325-330.
- Sadighzadeh, B.A., 2015, "Effect of Alloying Elements on Austempered Ductile Iron (ADI) Properties and its Process: Review", *China Foundry*, Vol. 12(1), pp. 54-70.
- Sellamuthu, P., Samuel, D. G. H., Dinakaran D., Premkumar V.P., Li, Z., Seetharaman, S., 2018, "Austempered Ductile Iron (ADI): Influence of Austempering Temperature on Microstructure, Mechanical and Wear Properties and Energy Consumption", *Metals*, Vol. 8 (53), pp. 1-12.
- Sohi, M.H., Ahmadabadi, M.N., Vahdat, A.B., 2004, "The Role of Austempering Parameters on the Structure and Mechanical Properties of Heavy Section ADI", J. Mater. Process. Technol. Vol.153– 154, pp. 203–208.
- Spengler, A.F., Briggs, H.K., 1972, *The Ductile Iron Process*, Miller and Company Service Handbook, Compendium 4.
- Tun, T., Lwin, K.T., 2008, "Optimizing the Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron for Automobile Differential Gear", J. Met. Mater. Miner., Vol. 18, pp. 199–205.
- Ucun, İ., Aslantaş, K., Taşgetiren, S., Gök, K., 2007, "Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Sinterlenmiş Karbür Kesici Takım ile Tornalama İşleminde Takım Performansının İncelenmesi", J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ, Vol. 22(4), pp. 739-744.
- Voigt, R. C., Loper, C. R., 1984, "Austempered Ductile Iron Process Control and Quality Assurance", *Journal of Heat Treating*, Vol. 3(4), pp. 291–309.
- Yalcın, Y., Özel, A., 1999, "Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir", *Metalürji Dergisi*, Vol. 23(119), pp. 15-19.
- Yescas-Gonzales, M.A., 2001, *Modelling the Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Irons*, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, Cambridge, UK, November.



# BETONARME KOLONLARIN SARGISIZ ve SARGILI BETON DAYANIMININ ANALİTİK OLARAK ARAŞTIRILMASI

# <sup>1</sup>S. Bahadır YÜKSEL, <sup>2</sup>Saeid FOROUGHİ

<sup>1,2</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE
<sup>1</sup>sbyuksel@ktun.edu.tr, <sup>2</sup>saeid.foroughi@yahoo.com

## (Geliş/Received: 10.01.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 05.03.2019)

ÖZ: Betonarme kolonlar taşıyıcı sistemlerin moment aktaran kritik yapısal sistemleridir ve yeterli dayanım ve süneklikte tasarlanmalıdır. Betonarme kolonların sargı donatısı özellikle depreme maruz kaldıkları durumlarda sargı etkisi ile kolonların dayanım ve sünekliğinin artırmasında önemli rol oynar. Betonarme kolonlarda sargı donatısı boyuna donatının yerel burkulmasını geciktirmek, kesme kuvvetine karşı koymak, ani kesme kırılmasını önlemek ve sargı etkisi ile dayanım ve sünekliği artırmak için kullanılır. Sismik yüklere maruz kalan betonarme elemanların davranışı, esas olarak betonun nihai dayanımına ve sünekliğine bağlıdır. Bu parametreleri araştırmak için değişik geometride betonarme kolon modelleri tasarlanmıştır. Sargı donatı çapının ve sargı donatı aralığının betonarme kolon modellerinin davranışına etkisi analitik olarak araştırılmıştır. Sargı donatıları ile sarılmış betonarme kolon modellerinin davranışını araştırmak için literatüre sunulmuş olan analitik modeller kullanılmıştır. Farklı parametrelerde tasarlanan sargılı kolon modelleri için gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri çizilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sargılı beton, Sargı donatısı, Sargılı beton dayanımı, Süneklik, Gerilme-şekil değiştirme ilişkileri

# Analytical Investigation of Confined and Unconfined Concrete Strength of Reinforced Concrete Columns

**ABSTRACT:** Reinforced concrete columns are the critical members of moment-resisting structural systems and have to be designed adequately in strength and ductility. Transverse reinforcement in concrete columns plays an important role in the improvement of strength and ductility of columns, especially when they are subjected to severe ground motion. Transverse reinforcement in concrete columns can be used to delay the local buckling of longitudinal bars, resist shear forces, avoid the sudden shear failure and confine the concrete to improve the strength and ductility. The behavior of reinforced concrete members subjected to seismic loads is mainly based on the ultimate strength of concrete and its ductility. Reinforced concrete column models having different cross-section have been designed to investigate these parameters. The effects of the transverse reinforcement spacing and transverse reinforcement diameter on the behavior of column models have been analytically investigated. Previously proposed analytical models were used to investigate the behavior of the reinforced confined column models. Stress-strain relationships were obtained for the confined concrete columns and the obtained results were compared and interpreted.

Key Words: Confined concrete, Confining reinforcement, Confined concrete strength, Ductility, Stress-strain relationship

## **GİRİŞ** (INTRODUCTION)

Meydana gelen yıkıcı depremler, mevcut binaların deprem performanslarının belirlenmesi konusundaki çalışmaların önemini arttırmıştır. Şiddetli depremlerde yapıların depreme dayanıklı performans tasarımı ve analizi; doğrusal ve doğrusal olmayan tasarım ve analiz olarak iki farklı davranış olarak ayrılmaktadır. Doğrusal elastik olmayan davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için sargısız ve sargılı beton modelleri, gerilme-şekil değiştirme bağıntıları ve kesitlerin sünekliklerinin hesaplanması gereklidir. Betonarme yapısal elemanların kesit davranışı, kesitte kullanılan malzeme, kesitin geometrisi ve kesite etki eden yüklemelere bağlıdır. Yapıların depreme karşı dayanıklı olabilmesi için, yapısal elemanların yeterli dayanımlarını sürdürebilmeleri için elemanların sünek olmaları gerekmektedir. Yapısal elemanların yeterli süneklikte olabilmelerini sağlamak için sargı donatısı kullanılır. Sargı donatılı betonarme yapısal elemanların gerilme-şekil değiştirme davranışı, sargı donatısı betonarme yapısal elemanların göre farklılık göstermektedir. (Foroughi, 2018).

Betonarme yapıların ve yapısal elemanların davranışı, elemanların gerilme-şekil değiştirme ve deformasyon özelliklerine bağlı olarak değişir. Sargılı betonun eksenel basınç gerilmeleri altındaki davranışının belirlenmesinde farklı araştırmacılar tarafından çok sayıda deneysel ve kuramsal çalışma ve davranış modeli önerilmiştir. Bu çalışmada sargılı betonarme elemanlar için Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) tarafından sargılı ve sargısız betonarme elemanlar için önerilmiş olan eksenel yük altındaki davranış modelleri incelenmiştir. Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) davranış modelleri kullanılarak sargılı ve sargısız betonarme yapısal elemanların davranışı dikkate alınarak sargılı beton basınç dayanımı analitik olarak araştırılmıştır. Değişik geometride toplam 33 adet betonarme kolon modeli tasarlanmıştır. Betonarme kolon modellerinin tasarımında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'de verilen hükümler dikkate alınmıştır. Değişik geometrilerde tasarlanan her betonarme kolon modeli için üç farklı sargı donatı çapı, her sargı donatı çapı için üç farklı sargı donatı aralığı olmak üzere toplam 99 adet betonarme kolon kesit modelinin sargılı beton basınç dayanımları araştırılmıştır. Sargılı beton basınç dayanımları hesaplanarak kesitlerin gerilme-şekil değiştirme ilişkileri elde edilmiştir. Farklı özelliklerde sargılı beton modellerinde sargılı beton basınç dayanımları hesaplanarak gerilme- birim şekil değiştirme ilişkileri elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar farklı parametrelere göre karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Boyuna donatı çapı, sargı donatı çapı ve sargı donatısı aralığının değişiminin betonarme kesitlerin davranışına etkisi Mander ve diğ. (1988a) ve Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modeline göre incelenmiştir. Mander ve diğ. (1988a) ve Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

## GERİLME- ŞEKİL DEĞİŞTİRME BAĞINTILARI (STRESS-STRAIN RELATIONSHIP)

Deprem etkileri altındaki betonarme yapısal elemanlar büyük şekil değiştirmelere maruz kaldıklarında yük taşıma kapasitelerini sargı donatısı arasında kalan çekirdek betonun davranışı belirler. Sargı donatıları ile sarılmış betonarme yapısal elemanların davranışını araştırmak için Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modeli kullanılmıştır. Tasarlanan betonarme kolon modellerinde araştırılan ve dikkate alınan parametreler sırasıyla sargı donatı çapı ve aralığı, boyuna ve sargı donatısının kesitteki dağılımı ve yerleşim planı, kesit geometrisi ve boyutlarıdır.

#### Sargılı Beton için Mander Modeli (Mander Model for Confined Concrete)

Mander beton modeli, dairesel, spiral, dikdörtgen sargı donatılı, dairesel, kare veya dikdörtgen kesitli betonarme yapı elemanların monotonik veya çevrimsel yükler altındaki davranışlarını tanımlamak amacıyla geliştirilmiştir. Sargılı beton davranışı ile ilgili geliştirilen bu model, Mander (1983), Mander ve diğ. (1988a) ve Mander ve diğ. (1988b) tarafından yapılan çalışmalara dayanmaktadır. Mander ve diğ. (1988a) dairesel, spiral, dikdörtgen sargı donatıya sahip sarılmış betonarme kesitler için gerilme-birim şekil değiştirme bağıntısı önermiştir.

(1)



Mander modeline göre kare ve dikdörtgen kesitler için sargılı beton basınç dayanımı (Confined concrete strength for square and rectangular sections according to Mander model)

**Şekil 1.** Sargı donatılı kesitlerde etkin sarılmış beton çekirdek alanı *Figure 1.* Effectively confined core for rectangular hoop reinforcement

Sargı betonun net en-kesit alanı ( $A_{cc}$ ) Denklem 1 ile hesaplanmaktadır.

 $A_{cc} = b_c d_c (1 - \rho_{cc})$ 

Etkili sargı bölgesi alanı; toplam etkisiz sargı bölgesi olan parabollerin alanından çıkararak (A<sub>i</sub>) Denklem 2 ile hesaplanmaktadır.

$$A_{i} = \frac{\sum_{i}^{n} (w_{i})^{2}}{6}$$
(2)

Etkili olarak sarılan kesit alanı (A<sub>e</sub>) Denklem 3 ile hesaplanmaktadır.

$$A_{e} = \left(b_{c}d_{c} - \sum_{i}^{n} \frac{(w'_{i})^{2}}{6}\right) \left(1 - \frac{S'}{2b_{c}}\right) \left(1 - \frac{S'}{2d_{c}}\right)$$
(3)

Etkili olarak sarılmış olan alanın ( $A_e$ ), sargılı beton en-kesit alanına ( $A_{cc}$ ) oranı ( $k_e$ ) olarak sargı etkisi katsayısı, dikdörtgen sargı donatılı kesitler için Denklem 4 ile hesaplanmaktadır.

$$k_{e} = \frac{A_{e}}{A_{cc}} = \frac{\left(1 - \sum_{i}^{n} \frac{(w'_{i})^{2}}{6b_{c}d_{c}}\right) \left(1 - \frac{S'}{2b_{c}}\right) \left(1 - \frac{S'}{2d_{c}}\right)}{(1 - \rho_{cc})}$$
(4)

Etkin sargı gerilmesini ifade etmek için  $A_{sx}$  ve  $A_{sy}$  kesit üzerinde x ve y yönlerinde kullanılan sargı donatılarının en-kesit alanı olmak üzere,  $\rho_x$  ve  $\rho_y$  bu yönlerde donatı oranı Denklem 5, 6 ve 7 ile hesaplanmaktadır.

$$\rho_{x} = \frac{A_{sx}}{s.d_{c}} , \ \rho_{y} = \frac{A_{sy}}{s.b_{c}} , \ \rho_{s} = \rho_{x} + \rho_{y}$$
(5)

x ve y yönünde betona uygulanan etkili yanal basınçları aşağıdaki denklemlerden hesaplanmaktadır.

$$f_{lx} = \frac{A_{sx}}{s.d_c} \cdot f_{yh} = \rho_x \cdot f_{yh} \quad , \quad f_{ly} = \frac{A_{sy}}{s.b_c} \cdot f_{yh} = \rho_y \cdot f_{yh} \tag{6}$$

$$f'_{lx} = k_e \frac{A_{sx}}{s.d_c} f_{yh} = k_e.f_{lx} , f'_{ly} = k_e \frac{A_{sy}}{s.b_c} f_{yh} = k_e.f_{ly}$$
(7)

Mander modeline göre dairesel kesitler için sargılı beton basınç dayanımı (Confined concrete strength for circular concrete sections according to Mander model)



**Şekil 2.** Sargı donatılı kesitlerde etkin sarılmış beton çekirdek alanı *Figure 2.* Effectively confined core for circular hoop reinforcement

Dairesel kesitler için sargılı betonun net en-kesit alanı ( $A_{cc}$ ) Denklem 8 ile hesaplanmaktadır.

$$A_{cc} = \frac{\pi}{4} d_s^2 (1 - \rho_{cc})$$

$$\tag{8}$$

Etkili olarak sarılan kesitin iki sargı donatısının net aralığının ortasında etkili olarak sarılan kesit alanı ( $A_e$ ) Denklem 9 ile hesaplanmaktadır. Burada s<sup>'</sup> düşey doğrultuda iki spiral veya dairesel net aralığı,  $d_s$ , ise çekirdek çapıdır.

$$A_{e} = \frac{\pi}{4} \left( d_{s} - \frac{s}{2} \right)^{2} = \frac{\pi}{4} d_{s}^{2} \left( 1 - \frac{s}{2d_{s}} \right)^{2}$$
(9)

Dairesel etriyeler için sargı etkisi katsayısı Denklem 10 ile hesaplanmaktadır.

$$k_{e} = \frac{A_{e}}{A_{cc}} = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_{s}}\right)^{2}}{(1 - \rho_{cc})}$$
(10)

Benzer şekilde dairesel spiraller için de Denklem 11 ve 12 ile hesaplanmalıdır.

$$k_{e} = \frac{A_{e}}{A_{cc}} = \frac{\left(1 - \frac{s}{2d_{s}}\right)}{(1 - o_{s})}$$
(11)

Spiral veya dairesel etriyelerle sarılmış çekirdek betona uygulanan yanal sargı basıncı aşağıdaki denklemden hesaplanmaktadır.

$$2f_{yh}A_{sp}=f_{l}sd_{s}$$
<sup>(12)</sup>

Burada  $f_{yh}$ ; sargı donatısının akma dayanımı,  $A_{sp}$ ; sargı donatı çubuğunun alanı,  $f_l$ ; betona uygulanan yanal sargı basıncı ve s; spiral veya dairesel etriyelerin merkezinden merkezine ölçülen mesafedir.  $\rho_s$ ; sargı donatı hacminin çekirdek betonunu hacmine oranı Denklem 13 ile hesaplanmaktadır.

$$\rho_{\rm s} = \frac{A_{\rm sp} \,\pi \,d_{\rm s}}{\frac{\pi}{d_{\rm s}} s} = \frac{4A_{\rm sp}}{d_{\rm s}}$$
(13)

Denklem (12) ve denklem (13)'ten;

$$f_{l} = \frac{1}{2} \rho_{s} f_{yh} \tag{14}$$

Dairesel kesitli kolonlarda betona uygulanan etkili yanal basınç değeri Denklem 15 ile hesaplanacaktır.

$$\dot{f}_{l} = \frac{1}{2} k_{e} \rho_{s} f_{yh}$$
(15)

Sargılı beton basınç dayanımı ( $\dot{f}_{cc}$ ) için Denklem 16 kullanılmaktadır.

$$\dot{f}_{cc} = \dot{f}_{co} \left( -1,254 + 2,254 \sqrt{1 + \frac{7,94\dot{f}_{l}}{\dot{f}_{co}} - 2\frac{\dot{f}_{l}}{\dot{f}_{co}}} \right) MPa$$
 (16)

Sargılı betonda beton basınç gerilmesi  $f_c$ , basınç birim şekil değiştirmesi  $\varepsilon_c$ 'nin fonksiyonu olarak Denklem 17 ile verilmektedir. Aşağıdaki bağlantılarda  $f_c$  ve  $\varepsilon_c$  sırasıyla herhangi bir andaki beton dayanımını ve karşılık gelen şekil değiştirmeyi temsil etmektedir. Monotonik olarak yüklenen betonda oluşacak gerilme aşağıdaki bağıntılar ile bulunabilir.

$$f_c = \frac{f_{cc} \times f}{r - 1 + x^r}$$

$$\tag{17}$$

Normalize edilmiş beton birim şekil değiştirmesi x ile r değişkenine ilişkin bağıntılar Denklem 18, 19, 20, 21 ve 22'de verilmiştir.

$$x = \frac{c}{\varepsilon_{cc}}$$
(18)  
$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right]$$
(19)

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$$
(20)

$$E_{c} = 5000 \sqrt{f'_{co}} MPa$$
<sup>(21)</sup>

$$E_{sec} = \frac{I_{cc}}{\varepsilon_{cc}}$$
(22)

Betondaki en büyük birim şekil değiştirme değeri  $\varepsilon_{cu}$  enine donatıda oluşan ilk kopma anındaki değere karşılık gelir. Sargılı betondaki maksimum basınç birim şekil değiştirmesi  $\varepsilon_{cu}$  Denklem 23'te verilmiştir:

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \cdot \rho_s \cdot f_{yw} \cdot \varepsilon_{su}}{f_{cc}}$$
(23)

Burada  $\rho_s$  toplam enine donatının hacimsel oranını,  $\varepsilon_{su}$  enine donatı çeliğinde maksimum gerilme altındaki birim uzama şekil değiştirmesini göstermektedir.

## Sargılı beton için Saatçioğlu ve Ravzi modeli (Saatcioglu and Ravzi models for confined concrete)

Saatçioğlu ve Ravzi (1992) çok sayıda dikdörtgen ve dairesel sargı donatılı betonarme numune üzerinde yaptıkları çalışmada sargı donatılı betonarme elemanlarda gerilme-şekil değiştirme ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) modeli geliştirmişlerdir. Sargılı beton dayanımı, yanal sargı basınç etkisi dikkate alınarak Denklem 24'teki gibi yazılır.

$$f_{cc}=k_3f_c+k_1\sigma_2$$
 (24)  
Normal dayanımlı betonlar için genelde k<sub>3</sub>=0.85 varsayılır. Saatçioğlu ve Ravzi (1992) k<sub>1</sub> için deney  
sonuçları ile iyi bir uyuşum gösteren Denklem 25'i önermektedir

$$k_1 = \frac{6.7}{(\sigma_2)^{0.17}}$$
(25)

# Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre dairesel kesitler için sargılı beton basınç dayanımı (Confined concrete strength for circular concrete sections according to Saatcioglu and Ravzi model)

Sık adımlarla yerleştirilmiş dairesel veya spiral sargı donatısının ve kolon boyuna donatısının mevcudiyeti ile de beton çekirdek etrafında sağlanacak yanal sargı basıncı düzgün yayılı olarak kabul edilebilir (Saatçioğlu ve Ravzi, 1992). Söz konusu basınç statikten Şekil 3'te görüldüğü gibi hesaplanabilir.



**Şekil 3.** Dairesel kolonlarda yanal sargı basıncı *Figure 3.* Lateral Pressure in Circular Columns

80

Dairesel fretle sarılmış beton için çıkarılan  $\sigma_2$  Denklem 26'da verilmiştir. Bu denklemde A<sub>o</sub>, s ve f<sub>ywk</sub>, sırasıyla fretin kesit alanı, aralığı ve akma dayanımıdır. D ise çekirdek çapıdır.

$$\sigma_2 = \frac{2A_o}{D(s)} f_{ywk}$$
(26)

Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre kare kesitler için sargılı beton basınç dayanımı (Confined concrete strength for square concrete sections according to Saatcioglu and Ravzi model)

Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi, sargının kare olduğu durumlarda sargı donatısında eğilme deformasyonu hâkimdir. Bu nedenle köşelerde sargı etkisi belirginken bu etki, sargı donatısının açıklık ortasında azalmaktadır. Bunun için, dikdörtgen sargı donatısının söz konusu olduğu durumlarda, betona uygulanan basınç düzgün yayılı değildir (Şekil 4).



**Şekil 4.** Kare kolonlarda yanal sargı basıncı *Figure 4.* Lateral Pressure in Square Columns

Basınç dağılımındaki bu değişmeyi dikkate alabilmek için  $\sigma_2$  yerine, eşdeğer düzgün yayılı basınç  $\sigma_{2e}$ , kullanılması önerilmektedir.

$$f_{cc} = k_3 f_c + k_1 \sigma_{2e}$$

$$k_{-} = \frac{6.7}{2}$$
(27)
(28)

$$K_1 = \frac{1}{(\sigma_{2e})^{0,17}}$$
 (20)

Deneysel verilerden yararlanarak  $\sigma_{2e}$  Denklem 29 ve 30'dan çıkartılmıştır (kare kesit b<sub>kx</sub>=b<sub>ky</sub>).

$$\sigma_{2e} = \beta \sigma_2 \tag{29}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sum A_o f_{ywk}(\sin \alpha)}{(s \times b_k)} \tag{30}$$

Eşdeğer sargı basıncı, ortalama sargı basıncını  $\beta$  ile tanımlanacak bir azaltma katsayısına bağlı olarak tanımlanmıştır.

$$\beta = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_k}{a}\right) \left(\frac{b_k}{s}\right) \left(\frac{1}{\sigma_2}\right)} \le 1.0 \tag{31}$$

Denklem 31'deki "a" sargı donatısına mesnet oluşturan iki boyuna donatı merkezi arasındaki uzaklıktır. Boyuna donatının mesnet olabilmesi için, bu donatının etriye köşesinde yer alması veya çirozlarla tutturulmuş olması gerekir.

# Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre dikdörtgen kesit için sargılı beton basınç dayanımı (confined concrete strength for rectangular concrete sections according to Saatcioglu and Ravzi model)

Dairesel ve kare kesitler için belirtilen hesap yöntemi, dikdörtgen kesitli kolon elemanlarda da kullanılabilir. Dikdörtgen kesitli elemanlarda uzun kenara etkiyen sargı basıncı, kısa kenara etkiyen sargı basıncına göre beton dayanımı üzerinde daha çok etkili olmaktadır. Deneysel verilerin incelenmesi sonucunda dikdörtgen kesitli kolon elemanın uzun ve kısa kenarlarına etkiyen sargı basıncının kenar uzunlukları ile orantılı olduğu anlaşılmaktadır (Saatçioğlu ve Ravzi, 1992).



**Şekil 5.** Dikdörtgen kolonlarda yanal sargı basıncı *Figure 5.* Lateral Pressure Distribution in Rectangular Columns

Şekil 5'te görüleceği gibi  $\sigma_{2ex}$  ve  $\sigma_{2ey}$  kolon çekirdek alanına etkiyen ve sırasıyla  $b_{kx}$  ve  $b_{ky}$  kenarlarına dik olarak yayıldığı kabul edilen eşdeğer yanal sargı gerilmeleridir.

$$\sigma_{2e} = \frac{(\sigma_{2ex}b_{kx} + \sigma_{2ey}b_{ky})}{(b_{kx} + b_{ky})}$$

$$\sigma_{2x} = \frac{\sum A_{ox}f_{ywk}sin\alpha}{(1 - 1)^{2}} , \qquad \sigma_{2y} = \frac{\sum A_{oy}f_{ywk}sin\alpha}{(1 - 1)^{2}}$$
(32)
(33)

$$\sigma_{2x} = \frac{\sum A_{0x} I_{ywk} SHA}{(s \times b_{kx})} , \qquad \sigma_{2y} = \frac{\sum A_{0y} I_{ywk} SHA}{(s \times b_{ky})}$$
(33)

Dikdörtgen kesitlerde, " $\beta$ " azaltma katsayısı her iki yön için de ayrı ayrı hesaplanmalıdır:

$$\beta_{x} = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_{kx}}{a_{x}}\right)\left(\frac{b_{kx}}{s}\right)\left(\frac{1}{\sigma_{2x}}\right)} \le 1.0, \qquad \beta_{y} = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_{ky}}{a_{y}}\right)\left(\frac{b_{ky}}{s}\right)\left(\frac{1}{\sigma_{2y}}\right)}$$
(34)

$$\sigma_{2ex} = \beta_x \sigma_{2x}, \qquad \sigma_{2ey} = \beta_y \sigma_{2y} \tag{35}$$

Sargı donatılı betonun  $\sigma$ - $\varepsilon$  eğrisinin elde edilebilmesi için  $f_{cc}$ 'nin hesaplanması yeterli değildir.  $f_{cc}$ 'ye karşı gelen birim kısalmanın ( $\varepsilon_{coc}$ )'da tanımlanması gereklidir. Ayrıca eğrinin  $\varepsilon_{coc}$ 'dan sonraki bölümü de tanımlanmalıdır. Saatçioğlu ve Ravzi (1992)  $\varepsilon_{coc}$  için Denklem 36 ve 37'yi önermişlerdir ( $\varepsilon_{co}$ = 0,002).

$$\varepsilon_{\rm coc} = \varepsilon_{\rm co} [1+5\lambda] \tag{36}$$

$$\lambda = \frac{-1 - 2e}{k_3 f_c} \tag{37}$$

0.85fcc'ye karşı gelen birim kısalma için Denklem 38 ve 39 tanımlanmaktadır.

$$\varepsilon_{c85} = 260 \rho \varepsilon_{coc} + \varepsilon_{u85}$$

$$\rho = \frac{\sum A_{oxy} \sin \alpha}{(1 - v^2)}$$
(38)
(39)

$$s(b_{kx}+b_{ky})$$

Sargılı beton gerilme ilişkisi, betonun en büyük gerilme değerine kadar bir doğru ile ifade edilmiştir. Sargılı beton dayanımının %20'sinin sonrası kalıcı dayanım seviyesi olarak kabul edilmiştir. Saatçioğlu ve Razvi (1992) beton modeli, yanal sargı basıncının sıfır veya ihmal edilebilir bir değerde olması durumunda Hognestad (1951) tarafından önerilen sargısız beton modeli haline gelmektedir (Saatçioğlu ve Ravzi, 1992).

Eğrinin birinci bölümü: 
$$\sigma_{c} = f_{cc} \left[ \left( \frac{2\varepsilon_{c}}{\varepsilon_{coc}} \right)^{-} \left( \frac{\varepsilon_{c}}{\varepsilon_{coc}} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{1+2\lambda}} \le f_{cc}$$

$$(40)$$

Eğrinin ikinci bölümü: 
$$\sigma_c = f_{cc} + \left(\frac{f_{cc} - f_{c85}}{\varepsilon_{coc} - \varepsilon_{c85}}\right) (\varepsilon_c - \varepsilon_{coc})$$
 (41)

## MATERYAL ve METOT (MATERIALS and METHODS)

Bu çalışmada; ilk olarak doğrusal elastik olmayan davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için gerilmeşekil değiştirme bağıntıları, Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Razvi (1992) tarafından sargılı betonarme elemanlar için önerilmiş olan eksenel yük altındaki davranış modelleri hakkında bilgi verilmiştir. Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Razvi (1992) modelleri kullanılarak sargılı ve sargısız beton davranışı dikkate alınarak kolon modellerinin sargılı beton basınç dayanımları araştırılmıştır. Sargılı kolon modellerinin gerilme- birim şekil değiştirme ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) eğrileri elde edilmiştir. Bu çalışmada, betonarme kolon kesitlerine ait tasarım parametrelerinin, kesit davranışına etkisini incelenmek amacıyla değişik geometri ve parametrelere sahip toplam 33 adet betonarme kolon modeli tasarlanmıştır. Betonarme kolon modellerinin tasarımında TBDY, (2018)'de verilen hükümler dikkate alınmıştır. Değişik geometrilerde tasarlanan her betonarme kolon modeli için üç farklı sargı donatı çapı, her sargı donatı çapı için üç farklı sargı donatı aralığı olmak üzere toplam 99 adet betonarme kolon modellerinin üç farklı malzeme modelinden oluştuğu düşünülmüştür. Tasarlanan betonarme kolon modellerinin üç farklı malzeme modelinden oluştuğu düşünülmüştür. Farklı malzeme modeli olarak; sargısız beton modeli için kabuk betonu, sargılı beton modeli için çekirdek betonu ve donatı çeliği olarak S420 için verilen değerler kullanılmıştır (Çizelge 1). Tasarlanan betonarme kolon modellerine ait kesitlerin geometrileri, donatı yerleşim planı görünüşü Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da verilen betonarme kolon modellerinde boyuna donatı oranı, sargı donatısı çapı ve aralığının betonarme kesitlerin davranışına etkisi incelenmiştir. Farklı kesitler için tasarlanan boyuna donatı oranı, sargı donatı aralığı aşağıda verilmiştir. Çizelge 2'de verilen kesitlerin her biri için farklı sargı donatı çapı ve sargı donatı aralığı için Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Razvi (1992) modelleri kullanılarak kesitlerin sargılı beton basınç dayanımları hesaplanmıştır.

Çizelge 1.	Aalzeme modellerinde kullanılan parametreler
	Table 1. Material parameters used in the model

Malzeme	Parametre	Değer
Poton Sumifi	Sargısız betonun maksimum gerilmeye ulaştığı birim şekil-değiştirme değeri ( $\varepsilon_{co}$ )	0.002
Geton Sinifi:	Sargısız betonun nihai birim şekil-değiştirmesi (εcu)	0.0035
C30	Karakteristik beton basınç dayanımı (fck)	30MPa
	Donatı çeliğinin akma birim şekil değiştirmesi (ε <sub>sy</sub> )	0.0021
Danah Caliži	Donatı çeliğinin pekleşme birim şekil değiştirmesi ( $\varepsilon_{sp}$ )	0.008
Donati Çeligi:	Donatı çeliğinin kopma birim şekil değiştirmesi (ɛsu)	0.10
5420	Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımı (fyk)	420MPa
	Donatı çeliğinin karakteristik kopma dayanımı (fsu)	550MPa



**Şekil 6.** Tasarlanan kolon modellerinin kesit detayları *Figure 6.* Section details of designed column models

Tasarlanan farklı geometri ve parametrelere sahip betonarme kolonların kesit bilgileri ve detayları Çizelge 2'de verilmektedir. Farklı parametrelere göre toplam 99 adet kolon modeli tasarlanmıştır. Çizelge 2'de verilen betonarme kolonların her boyuna donatı oranı için üç farklı sargı donatı çapı ve üç farklı sargı donatı aralığına göre sargılı beton basınç dayanımları araştırılmıştır. Sargılı beton basınç dayanımları hesaplanarak kesitlerin gerilme-şekil değiştirme ilişkileri elde edilmiştir. Farklı parametrelere göre elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri farklı kolon modelleri için karşılaştırarak yorumlanmıştır. TBDY, (2018)'e göre kolonlarda boyuna donatı alanı, brüt kesitin %1'inden az, %4'ünden daha büyük olmayacak şekilde tasarlanmıştır. Kolon modellerinde boyuna donatı olarak Φ20'den Φ40'a kadar farklı donatılar kullanılmıştır.

	Table 2. Parameters of reinforced concrete column models											
Ka	re kol	on	Dairesel	kolon	Dikdör	tgen k	olon	Boyuna donatı	Sargı do	onatisi		
No	b	h	No	D	No	b	h	Çap	Çap	Aralık(mm)		
S1			CR1		REC1			Ф20	Φ8, Φ10, Φ12	50, 75, 100		
S2			CR2		REC2			Ф22	Φ8, Φ10, Φ12	50, 75, 100		
S3			CR3		REC3			Φ24	Φ8, Φ10, Φ12	50, 75, 100		
S4			CR4		REC4			Ф26	Φ8, Φ10, Φ12	50, 75, 100		
S5			CR5		REC5			Φ28	Φ8, Φ10, Φ12	50, 75, 100		
S6	500	500	CR6	565	REC6	300	550	Ф30	Φ8, Φ10, Φ12	50, 75, 100		
S7			CR7		REC7			Ф32	Φ8, Φ10, Φ12	50, 75, 100		
S8			CR8		REC8			Ф34	Φ8, Φ10, Φ12	50, 75, 100		
S9			CR9		REC9			Ф36	Φ8, Φ10, Φ12	50, 75, 100		
S10			CR10		REC10			Ф38	Φ8, Φ10, Φ12	50, 75, 100		
S11			CR11		REC11			Φ40	Φ8, Φ10, Φ12	50, 75, 100		

**Çizelge 2.** Tasarlanan betonarme kolon modellerine ait parametreler

### ANALİTİK ÇALIŞMA (ANALYTICAL STUDY)

Tasarlanan yapısal betonarme kolonların yanal sargı basıncına etkiyen parametreler sırasıyla boyuna donatı oranı, sargı donatısı çapı, sargı donatısı aralığı ele alınarak sargılı beton basınç dayanımı hesaplanmıştır. Boyuna donatı oranının, sargı donatı çapının ve sargı donatı aralığının tasarlanan betonarme kolonların davranışı üzerindeki etkisi Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Razvi (1992) modellerine göre sargılı beton basınç dayanımları hesaplanarak araştırılmıştır. Farklı parametrelere göre elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri farklı betonarme kolon modelleri için karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Saatçioğlu ve Razvi (1992) modellerine göre kare en-kesitli kolon modelleri için yapılan hesap sonuçları Çizelgeler halinde özetlenmiştir. Mander ve diğ. (1988a) modeline göre tasarlanan kare en-kesitli kolon modellerinde hesaplanan değerler incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir (Çizelge 3).

**Çizelge 3.** Mander modeline göre kare en-kesitli kolon modellerinin hesap sonuçları

	140	ne 5. Culturation re	suns of square	1035 5001	ionai coran	in mouers ac	coruing io n	ипист тойсі		
No	Boyuna donatı	Sargı donatısı	$A_e (mm^2)$	ke	$ ho_{s}$	f <sub>l</sub> (Mpa)	$f'_l(Mpa)$	$f'_{cc}(Mpa)$	ε <sub>cc</sub>	ε <sub>cu</sub>
		Φ8/50	134940.88	0.70	0.0136	2.87	2.01	37.27	0.0066	0.0212
		$\Phi 8/75$	127046.73	0.659	0.009	1.91	1.26	33.32	0.0051	0.0168
		$\Phi 8/100$	119390.48	0.619	0.0068	1.43	0.890	31.18	0.0042	0.0143
		Φ10/50	134820.86	0.705	0.0214	4.5	3.17	42.72	0.0088	0.0276
S1	8Φ20	Φ10/75	126915.23	0.664	0.0142	3.0	1.99	37.20	0.0066	0.0221
		Φ10/100	119248.44	0.624	0.0107	2.25	1.40	34.12	0.0054	0.0188
		Φ12/50	134698.89	0.711	0.0310	6.51	4.63	48.57	0.0110	0.0340
		Φ12/75	126781.85	0.669	0.0206	4.34	2.90	41.53	0.0083	0.0274
		Φ12/100	119104.57	0.629	0.0154	3.25	2.05	37.48	0.0067	0.0234

Mander ve diğ. (1988a) modeline göre kare en-kesitli kolon modellerinden hesaplanan sargılı beton için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları tanımlanmıştır. Sargılı betonda basınç gerilmesi  $f_{cc}$ , basınç birim şekil değiştirmesi  $\varepsilon_{cc}$ 'nin fonksiyonu olarak elde edilen  $\sigma$ - $\varepsilon$  ilişkileri Şekil 7'de özetlenmiştir. Farklı sargı donatı aralıkları için Şekil 7'de verilen  $\sigma$ - $\varepsilon$  eğrisi 8mm, 10mm ve 12mm sargı donatı çapına göre hazırlanmıştır. Tasarlanan betonarme kolon modellerinde boyuna donatı oranı, sargı donatı çapı ve sargı donatı aralığının değişiminin, sargılı beton dayanımına etkisi Mander ve diğ. (1988a) beton modeline göre hesaplanarak karşılaştırılmıştır.



*Figure 7. Stress-strain curves of square cross-section column models according to Mander model* 

Tasarlanan kare en-kesitli betonarme kolon modellerinin Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modeline göre hesap sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir.

No	Boyuna donatı	Sargı donatısı	$\rho_{s}$	$\sigma_2(MPa)$	$\sigma_{2e}(MPa)$	k1	$f_{cc}(MPa)$	$\varepsilon_{coc}$	ε <sub>c85</sub>	$\varepsilon_{c20}$
	-	Φ8/50	0.0068	2.865	1.912	6.00	36.97	0.0065	0.0153	0.0536
		$\Phi 8/75$	0.0045	1.910	1.274	6.430	33.69	0.0052	0.0130	0.0470
		$\Phi 8/100$	0.0034	1.433	0.956	6.751	31.95	0.0045	0.0118	0.0435
		Φ10/50	0.0107	4.498	2.396	5.775	39.33	0.0074	0.0244	0.0983
S1	8Ф20	Φ10/75	0.0071	2.998	1.597	6.187	35.38	0.0058	0.0201	0.0820
		Φ10/100	0.0053	2.249	1.198	6.497	33.28	0.0050	0.0178	0.0734
		Φ12/50	0.0154	6.506	2.883	5.596	41.63	0.0083	0.0373	0.1630
		Φ12/75	0.0103	4.338	1.922	5.995	37.02	0.0065	0.0300	0.1320
		Φ12/100	0.0077	3.253	1.441	6.296	34.57	0.0055	0.0262	0.1156

**Çizelge 4.** Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre kare en-kesitli kolon modellerinin hesap sonuçları *Table 4.* Calculation results of square cross section column models according to Saatcioglu and Ravzi model

Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modeline göre kare en-kesitli kolon modellerinden hesaplanan sargılı beton için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları tanımlanmıştır (Şekil 8). Farklı sargı donatı aralıkları için Şekil 8'de verilen σ-ε eğrileri 8mm, 10mm ve 12mm sargı donatı çapına göre hazırlanmıştır.



Şekil 8. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre kare en-kesitli kolonların gerilme-şekil değiştirme grafikleri Figure 8. Stress-strain curves of square cross-section column models according to Saatcioglu and Ravzi model

Tasarlanan dairesel en-kesitli betonarme kolon elemanlarının yanal sargı basıncına etkiyen parametreler sırasıyla boyuna donatı oranı, sargı donatısının çapı ve sargı donatısı aralığı ele alınarak sargılı beton basınç dayanımları hesaplanmıştır (Çizelge 5). Yapılan hesaplar sonucunda farklı parametrelere göre gerilme şekil değiştirme eğrileri çizilmiştir.

	7	Fable 5. Calcul	ation results of a	circular cross-s	sectional colun	1n models ac	cording to N	1ander model		
No	Boyuna donatı	Sargı donatısı	A <sub>e</sub> (mm <sup>2</sup> )	k <sub>e</sub> (mm <sup>2</sup> )	$ ho_{\rm s}({\rm mm^2})$	f <sub>l</sub> (Mpa)	$f'_l(Mpa)$	f'cc(Mpa)	ε <sub>cc</sub>	ε <sub>cu</sub>
		Φ8/50	185507.90	0.968	0.0079	1.66	1.61	35.24	0.0085	0.0145
		$\Phi 8/75$	176088.03	0.943	0.0052	1.11	1.05	32.12	0.0046	0.0117
		Φ8/100	166913.60	0.918	0.0039	0.832	0.765	30.45	0.0039	0.0101
		Φ10/50	184745.28	0.970	0.0124	2.61	2.53	39.83	0.0076	0.0187
CR1	8Ф20	$\Phi 10/75$	175345.04	0.945	0.0083	1.74	1.64	35.42	0.0059	0.0150
		$\Phi 10/100$	166190.25	0.920	0.0062	1.30	1.20	33.00	0.0049	0.0128
		$\Phi 12/50$	183984.23	0.972	0.0179	3.77	3.67	44.82	0.0095	0.0228
		Φ12/75	174603.63	0.946	0.0120	2.52	2.38	39.12	0.0073	0.0184
		Φ12/100	165468.47	0.921	0.0090	1.88	1.74	35.91	0.0060	0.0157

**Çizelge 5.** Mander modeline göre dairesel en-kesitli kolon modellerinin hesap sonuçları *Table 5. Calculation results of circular cross-sectional column models according to Mander model* 

Mander ve diğ. (1988a) modeline göre dairesel en-kesitli kolon modelleri için hesaplanan sargılı beton gerilme-şekil değiştirme bağıntıları tanımlanmıştır. Sargılı betonda basınç gerilmesi  $f_{cc}$ , basınç birim şekil değiştirmesi  $\varepsilon_{cc}$ 'nin fonksiyonu olarak elde edilen  $\sigma$ - $\varepsilon$  ilişkileri Şekil 9'da özetlenmiştir. Farklı sargı donatı aralıkları için Şekil 9'da verilen  $\sigma$ - $\varepsilon$  eğrileri 8mm, 10mm ve 12mm sargı donatı çapına göre hazırlanmıştır.



Şekil 9. Mander modeline göre dairesel en-kesitli kolonların gerilme-şekil değiştirme grafikleri Figure 9. Stress-strain curves of circular cross-section column models according to Mander model

Tasarlanan dairesel en-kesitli betonarme kolon modellerinin Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modeline göre hesap sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir.

**Çizelge 6.** Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre göre dairesel en-kesitli kolon modellerinin hesap sonuçları *Table 6.* Calculation results of circular cross-sectional column models according to Saatcioglu and Ravzi model

No	Boyuna donatı	Sargı donatısı	$ ho_{s}$	$\sigma_2(MPa)$	$K_1$	$f_{cc}(MPa)$	$\varepsilon_{coc}$	ε <sub>c85</sub>	$\varepsilon_{c20}$
		Φ8/50	0.0079	1.665	6.143	35.73	0.0060	0.0162	0.0603
		$\Phi 8/75$	0.0052	1.110	6.581	32.80	0.0048	0.0104	0.0348
		$\Phi 8/100$	0.0039	0.832	6.911	31.25	0.0042	0.0081	0.0252
		Φ10/50	0.0124	2.612	5.690	40.36	0.0078	0.0291	0.1214
CR1	8Ф20	Φ10/75	0.0082	1.741	6.096	36.12	0.0061	0.0170	0.0644
		Φ10/10	0.0062	1.306	6.402	33.86	0.0052	0.0123	0.0429
		Φ12/50	0.0179	3.777	5.345	45.69	0.0099	0.0501	0.2246
		Φ12/75	0.0120	2.518	5.726	39.92	0.0076	0.0276	0.1143
		Φ12/100	0.0090	1.888	6.013	36.85	0.0064	0.0189	0.0727



Şekil 10. Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre dairesel en-kesitli kolonların gerilme-şekil değiştirme grafikleri

Figure 10. Stress-strain curves of square cross-section column models according to Saatcioglu and Ravzi model

Mander ve diğ. (1988a) modeline göre tasarlanan dikdörtgen en-kesitli kolon modellerinde hesaplanan değerler incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir (Çizelge 7).

**Çizelge 7.** Mander modeline göre dikdörtgen en-kesitli kolon modellerinin hesap sonuçları *Table 7.* Calculation results of rectangular cross-sectional column models according to Mander model

No	Sargı donatısı	$ ho_{s}$	f <sub>lx</sub> (MPa)	f <sub>ly</sub> (MPa)	f <sub>l</sub> (MPa)	f <sub>lx</sub> (MPa)	$f_{ly}$ (MPa)	f <sub>l</sub> (MPa)	Í <sub>cc</sub> (MPa)	ε <sub>cc</sub>	ε <sub>cu</sub>
	Φ8/50	0.0207	3.43	5.23	4.33	2.48	3.78	3.13	42.55	0.0087	0.0268
	$\Phi 8/75$	0.0138	2.29	3.49	2.89	1.52	2.32	1.92	36.83	0.0064	0.0216
	$\Phi 8/100$	0.0103	1.72	2.62	2.17	1.04	1.59	1.32	34.63	0.0052	0.0184
	Φ10/50	0.0325	5.39	8.25	6.82	3.93	6.02	4.97	49.84	0.0115	0.0346
REC1	Φ10/75	0.0216	3.59	5.50	4.54	2.41	3.68	3.04	42.16	0.0085	0.0281
	Φ10/100	0.0162	2.69	4.12	3.41	1.65	2.53	2.09	37.68	0.0068	0.0243
	Φ12/50	0.0471	7.79	11.98	9.88	5.74	8.82	7.28	57.34	0.0145	0.0426
	Φ12/75	0.0314	5.19	7.98	6.59	3.51	5.40	4.45	47.91	0.0108	0.0348
	Φ12/100	0.0235	3.89	5.99	4.94	2.41	3.70	3.05	42.19	0.0085	0.0302

Mander ve diğ. (1988a) modeline göre dikdörtgen en-kesitli kolon modellerinden hesaplanan sargılı beton için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları tanımlanmıştır. Sargılı betonda basınç gerilmesi  $f_{cc}$ , basınç birim şekil değiştirmesi  $\varepsilon_{cc}$ 'nin fonksiyonu olarak elde edilen  $\sigma$ - $\varepsilon$  ilişkileri Şekil 11'de özetlenmiştir. Farklı sargı donatı aralıkları için Şekil 11'de verilen  $\sigma$ - $\varepsilon$  eğrileri 8mm, 10mm ve 12mm sargı donatı çapına göre hazırlanmıştır.



**Şekil 11.** Mander modeline göre dikdörtgen en-kesitli kolonların gerilme-şekil değiştirme grafikleri *Figure 11.* Stress-strain curves of rectangular cross-section column models according to Mander model

Tasarlanan dairesel en-kesitli betonarme kolon modellerinin Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modeline göre hesap sonuçları Çizelge 8'de verilmiştir.

**Çizelge 8.** Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre dikdörtgen en-kesitli kolon modellerinin hesap sonuçları *Table 8.* Calculation results of rectangular cross-sectional column models according to Saatcioglu and Ravzi model

No	Sargı donatısı	$ ho_{s}$	σ <sub>2x</sub> (MPa)	σ <sub>2y</sub> (MPa)	σ <sub>2ex</sub> (MPa)	σ <sub>2ey</sub> (MPa)	σ <sub>2e</sub> (MPa)	$K_1$	f <sub>cc</sub> (MPa)	$\varepsilon_{coc}$	ε <sub>c85</sub>	$\varepsilon_{c20}$
	Φ8/50	0.0096	3.43	5.23	1.59	3.33	2.76	5.64	41.04	0.0081	0.0240	0.0928
	Φ8/75	0.0064	2.29	3.49	1.06	2.22	1.84	6.04	36.60	0.0063	0.0144	0.0490
	Φ8/100	0.0048	1.72	2.62	0.80	1.66	1.38	6.34	34.24	0.0054	0.0105	0.0328
	Φ10/50	0.0150	5.39	8.25	2.00	4.18	3.46	5.42	44.28	0.0093	0.0404	0.1752
REC1	Φ10/75	0.0100	3.59	5.50	1.33	2.79	2.31	5.81	38.91	0.0072	0.0227	0.0899
	Φ10/100	0.0075	2.69	4.12	1.00	2.09	1.73	6.10	36.06	0.0061	0.0158	0.0578
	Φ12/50	0.0218	7.79	11.98	2.41	5.04	4.17	5.26	47.44	0.0106	0.0639	0.295
	Φ12/75	0.0145	5.19	7.98	1.60	3.36	2.78	5.63	41.17	0.0081	0.0345	0.1492
	Φ12/100	0.0109	3.89	5.99	1.20	2.52	2.09	5.91	37.84	0.0068	0.0232	0.0940



değiştirme grafikleri

Figure 12. Stress-strain curves of rectangular cross-section column models according to Saatcioglu and Ravzi model

Farklı boyuna donatı oranına sahip kare en-kesitli betonarme kolon kesitleri Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Razvi (1992) modelleri kullanılarak kesitlerin sargılı beton basınç dayanımları hesaplanmıştır. Çizelge 9 ve 10'da kare en-kesitli betonarme kolon kesitlerinin farklı boyuna donatı oranı için sargılı beton basınç dayanımları sunulmuştur.

No	Boyuna donatı	Sargı donatısı	$ ho_{s}$	f <sub>l</sub> (MPa)	f <sub>l</sub> (MPa)	f΄ <sub>cc</sub> (MPa)	€ <sub>cc</sub>	ε <sub>cu</sub>
S1	8Φ20		0.0136	2.87	2.01	37.27	0.0066	0.0212
S2	8Φ22			2.86	2.03	37.39	0.0067	0.0212
S3	8Φ24	Φ8/50		2.86	2.06	37.52	0.0067	0.0211
S4	8Φ26			2.86	2.08	37.65	0.0068	0.0210
S5	8Φ28			2.86	2.10	37.78	0.0068	0.0210
S6	8Ф30			2.86	2.13	37.92	0.0069	0.0209
S7	8Φ32			2.86	2.16	38.05	0.0069	0.0209
S8	8Ф34			2.86	2.19	38.19	0.0070	0.208
S9	8Ф36			2.86	2.22	38.33	0.0070	0.0207
S10	8Φ38			2.86	2.25	38.47	0.0071	0.0207
S11	8Φ40			2.86	2.28	38.62	0.0071	0.0206

**Çizelge 9.** Mander modeline göre kare en-kesitli kolon modellerinin hesap sonuçları *Table 9.* Calculation results of square cross-sectional column models according to Mander model

**Çizelge 10.** Saatçioğlu ve Ravzi modeline göre kare en-kesitli kolon modellerinin hesap sonuçları *Table 10.* Calculation results of square cross-sectional column models according to Saatcioglu and Ravzi model

No	Boyuna donatı	Sargı donatısı	$ ho_{s}$	σ₂ (MPa)	σ <sub>2e</sub> (MPa)	f <sub>cc</sub> (MPa)	$\varepsilon_{coc}$	E <sub>c85</sub>	$\varepsilon_{c20}$
S1	8Φ20			2.86	1.91	36.97	0.0065	0.0153	0.053
S2	8Φ22			2.86	1.92	36.99	0.0065	0.0153	0.053
S3	8Φ24			2.86	1.92	37.02	0.0065	0.0153	0.053
S4	8Φ26			2.86	1.92	37.04	0.0065	0.0153	0.053
S5	8Φ28	Φ8/50	0.0068	2.86	1.93	37.06	0.0065	0.0154	0.053
S6	8Ф30			2.86	1.93	37.09	0.0065	0.0154	0.053
S7	8Ф32			2.86	1.94	37.11	0.0065	0.0154	0.053
S8	8Ф34			2.86	1.94	37.14	0.0065	0.0154	0.053
S9	8Ф36			2.86	1.95	37.16	0.0065	0.0154	0.053
S10	8Φ38			2.86	1.95	37.18	0.0065	0.0154	0.054
S11	8Ф40			2.86	1.96	37.21	0.0065	0.0154	0.054

## ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA (RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION)

Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerinden elde edilen sargılı beton basınç dayanımlarını karşılaştırmak amacı ile sayısal çalışmalar yapılmıştır. TBDY,(2018)'de verilen koşullara göre incelenen kolon modellerinde farklı boyuna donatı çapı, farklı sargı donatısı çapı ve aralığına sahip betonarme kesitleri Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerine göre sargılı basınç dayanımları hesaplanmıştır. Farklı sargı donatı çapı ve aralığı için Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modelleri kullanılarak betonun gerilme şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Modeller için yapılan hesap sonuçları Çizelgeler halinde özetlenmiştir. Kare en-kesitli betonarme kolon modellerinde Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerine göre hesaplanan sargılı beton dayanımı ve maksimum gerilmeye karşı gelen birim kısalma değerlerinin karşılaştırması Çizelge 11'de verilmiştir. Farklı boyuna donatı oranı, farklı sargı donatısı çapı ve aralıklarında tasarlanan modellerde hesaplanan değerler incelendiğinde çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Na	Boyuna donatı	Sargı donatısı	Mander	modeli	Saatçioğlu modeli	
100			f <sub>cc</sub> (MPa)	ε <sub>cc</sub>	f <sub>cc</sub> (MPa)	ε <sub>coc</sub>
S1		Φ8/50	37.27	0.0066	36.97	0.0065
	8Φ20	$\Phi 8/75$	33.32	0.0051	33.69	0.0052
		$\Phi 8/100$	31.18	0.0042	31.95	0.0045
		Φ10/50	42.72	0.0088	39.33	0.0074
		Φ10/75	37.20	0.0066	35.38	0.0058
		Φ10/100	34.12	0.0054	33.28	0.0050
		Φ12/50	48.57	0.0110	41.63	0.0083
		Φ12/75	41.53	0.0083	37.02	0.0065
		Φ12/100	37.48	0.0067	34.57	0.0055

**Çizelge 11.** Kare en-kesitli betonarme kolon modellerinde hesaplanan sonuçların karşılaştırması *Table 11. Comparison of calculated results in square cross-section reinforced concrete column models* 

Kare en-kesitli betonarme kolon modellerinde Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerine göre gerilme-şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Kare en-kesitli betonarme kolonların Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerine göre gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 13'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.





Figure 13. Comparison of stress-strain curves of square cross-section reinforced concrete columns according to Mander, Saatcioglu and Ravzi models

Dairesel en-kesitli betonarme kolon modellerinde Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerine göre hesaplanan sargılı beton dayanımı ve maksimum gerilmeye karşı gelen birim kısalma değerlerinin karşılaştırması Çizelge 12'de verilmiştir.

Ma	Boyuna donatı	Sargı donatısı	Mander mo	odeli	Saatçioğlu modeli	
110			f <sub>cc</sub> (MPa)	ε <sub>cc</sub>	f <sub>cc</sub> (MPa)	ε <sub>coc</sub>
	10Ф20	Φ8/50	35.24	0.0085	35.73	0.0060
		$\Phi 8/75$	32.12	0.0046	32.80	0.0048
CR1		$\Phi 8/100$	30.45	0.0039	31.25	0.0042
		Φ10/50	39.83	0.0076	40.36	0.0078
		Φ10/75	35.42	0.0059	36.12	0.0061
		Φ10/100	33.00	0.0049	33.86	0.0052
		Φ12/50	44.82	0.0095	45.69	0.0099
		Φ12/75	39.12	0.0073	39.92	0.0076
		Φ12/100	35.91	0.0060	36.85	0.0064

**Çizelge 12.** Dairesel en-kesitli betonarme kolon modellerinde hesaplanan sonuçların karşılaştırması *Table 12.* Comparison of calculated results in circular cross-section reinforced concrete column models

Dairesel en-kesitli betonarme kolonların Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerine göre gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 14'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



**Şekil 14.** Dairesel en-kesitli betonarme kolonların Mander, Saatçioğlu ve Ravzi modellerine göre gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması

Figure 14. Comparison of stress-strain curves of circular cross-section reinforced concrete columns according to Mander, Saatcioglu and Ravzi models

Dikdörtgen en-kesitli betonarme kolon modellerinde Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerine göre hesaplanan sargılı beton dayanımı ve maksimum gerilmeye karşı gelen birim kısalma değerlerinin karşılaştırması Çizelge 13'de verilmiştir.

No	Boyuna donatı	Sargı donatısı	Mander mo	odeli	Saatçioğlu modeli	
			f <sub>cc</sub> (MPa)	ε <sub>cc</sub>	f <sub>cc</sub> (MPa)	ε <sub>coc</sub>
		Φ8/50	42.55	0.0087	41.04	0.0081
	10Ф20	$\Phi 8/75$	36.83	0.0064	36.60	0.0063
REC1		$\Phi 8/100$	34.63	0.0052	34.24	0.0054
		Φ10/50	49.84	0.0115	44.28	0.0093
		Φ10/75	42.16	0.0085	38.91	0.0072
		Φ10/100	37.68	0.0068	36.06	0.0061
		Φ12/50	57.34	0.0145	47.44	0.0106
		Φ12/75	47.91	0.0108	41.17	0.0081
		Φ12/100	42.19	0.0085	37.84	0.0068

**Çizelge 13.** Dikdörtgen en-kesitli betonarme kolon modellerinde hesaplanan sonuçların karşılaştırması *Table 13. Comparison of calculated results in rectangular cross-section reinforced concrete column models* 

Dikdörtgen en-kesitli betonarme kolonların Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerine göre gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 15'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



**Şekil 15.** Dikdörtgen en-kesitli betonarme kolonların Mander, Saatçioğlu ve Ravzi modellerine göre gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması

Figure 15. Comparison of stress-strain curves of rectangular cross-section reinforced concrete columns according to Mander, Saatcioglu and Ravzi models

Kare en-kesitli betonarme kolon modellerinde farklı boyuna donatı oranı için Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerine göre hesaplanan sargılı beton dayanımı ve maksimum gerilmeye karşı gelen birim kısalma değerlerinin karşılaştırması Çizelge 14'te verilmiştir.

1010 14	. comparison of care	unson of culcululeu results in st		modeli	Saatçioğlu modeli		
No	Boyuna donatı	Sargı donatısı	f <sub>cc</sub> (MPa)	ε <sub>cc</sub>	f <sub>cc</sub> (MPa)	ε <sub>coc</sub>	
S1	8Ф20		37.27	0.0066	36.97	0.0065	
S2	8Ф22		37.39	0.0067	36.99	0.0065	
S3	8Ф24		37.52	0.0067	37.02	0.0065	
S4	8Ф26		37.65	0.0068	37.04	0.0065	
S5	8Φ28		37.78	0.0068	37.06	0.0065	
S6	8Ф30	Φ8/50	37.92	0.0069	37.09	0.0065	
S7	8Ф32		38.05	0.0069	37.11	0.0065	
S8	8Ф34		38.19	0.0070	37.14	0.0065	
S9	8Ф36		38.33	0.0070	37.16	0.0065	
S10	8Ф38		38.47	0.0071	37.18	0.0065	
S11	8Ф40		38.62	0.0071	37.21	0.0065	

**Çizelge 14.** Kare en-kesitli betonarme kolon modellerinde hesaplanan sonuçların karşılaştırması **Table 14.** Comparison of calculated results in sauare cross-section reinforced concrete column models

Yapılan hesapların sonucunda sargı donatı çapının ve sargı donatı aralığının sargılı beton basınç dayanımı ve sünekliği üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Tüm modeller için özellikle sargı donatısı oranının betonarme kolon kesitlerin yanal sargı basıncının üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Sargı donatı aralığının sıklaşması kesitin sünekliği ve taşıma kapasitesi üzerinde daha fazla etkiye sahiptir. Betonarme kesitin gerçek davranışı görmek için sargı donatısı oranını dikkate alan beton modeli kullanılmalıdır. Sargı donatısı oranının artması kesitin sünekliğini ve yanal sargı basıncını arttırmaktadır.

Farklı geometri ve parametrelerde tasarlanan betonarme kolon modellerinin Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerine göre hesaplanan sargılı beton dayanımı ve maksimum gerilmeye karşı gelen birim kısalma değerlerinin karşılaştırması Şekil 13, 14, 15 ve Çizelge 11, 12, 13'te verilmiştir. Kare en-kesitli betonarme kolon modellerinde farklı sargı donatısı oranı ve aralığına göre Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerinden elde edilen sonuç değerlerin karşılaştırmasından, sargılı beton basınç dayanımlarında farklılık görülmektedir. Kare en-kesitli betonarme kolon modellerinde 8mm sargı donatısı çapı ve 50mm sargı donatısı aralığı için Mander ve diğ. (1988a) ve Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerinden hesaplanan sargılı beton basınç dayanımları arasındaki fark fazladır. Şekil 13 ve Çizelge 11'den görüleceği gibi sargı donatı aralığının artması ile her iki model için hesaplanan sargılı beton basınç dayanımındaki farklar azalmaktadır. Sargı donatısı aralığı sabit iken sargı donatı çapının artması ile her iki modele göre hesaplanan sargılı beton basınç dayanımlarının arasındaki farkların artmakta olduğu sonucu elde edilmiştir (Şekil 13 ve Çizelge 11).

Dairesel en-kesitli kolon modellerinde farklı sargı donatısı oranı ve aralığına göre Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerinden elde edilen sonuç değerlerin karşılaştırmasından sargılı beton basınç dayanımlarında farklılıkların ihmal edilebilecek düzeyde olduğu görülmektedir. Dairesel en-kesitli kolon modellerinde sargı donatı aralığı ve sargı donatısı çapının değişmesi durumunda her iki modele göre hesaplanan sargılı beton basınç dayanımlarının arasında oluşan farklılıkların çok az olduğu sonucu elde edilmiştir (Şekil 14 ve Çizelge 12).

Dikdörtgen en-kesitli betonarme kolon modellerinde farklı sargı donatısı oranı ve aralığına göre Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerinden elde edilen sonuç değerlerin karşılaştırmasından, sargılı beton basınç dayanımlarında farklılıkların oluştuğu görülmektedir. Dikdörtgen en-kesitli kolon modellerinde 50mm sargı donatı aralığı için Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerinden hesaplanan sargılı beton basınç dayanımları arasındaki farklılıkların büyük olduğu görülmektedir. Betonarme kolon kesitlerinde sabit sargı donatısı çapı için artan sargı donatısı aralığına göre her iki model için hesaplanan sargılı beton basınç dayanımları arasındaki farkların azaldığı görülmektedir. Betonarme kolon kesitlerinde sabit sargı donatısı aralığı için, sargı donatısı çapının artması ile Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerinden hesaplanan sargılı beton basınç dayanımları arasındaki farkların artmakta olduğu sonucu elde edilmiştir (Şekil 15 ve Çizelge 13).

Tasarlanan betonarme kolon kesitlerinde boyuna donatı oranının sargılı beton basınç dayanımına etkisini araştırmak için kare en-kesitli betonarme kolon modellerinde farklı boyuna donatı oranı için Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerine göre hesaplanan sargılı beton dayanımı ve maksimum gerilmeye karşı gelen birim kısalma değerlerinin karşılaştırması Çizelge 14'te verilmiştir. Sonuçlardan görüleceği gibi sabit sargı donatısı çapı ve aralığı için, boyuna donatı oranının değişmesi her iki modelde de sargılı beton basınç dayanımında ihmal edilebilecek düzeyde farklılıklar oluşturmuştur.

## SONUÇ (RESULTS)

Sayısal çalışmalarda farklı geometri ve parametrelerde tasarlanan kolon modellerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması Çizelgeler ve Şekiller halinde özetlenerek sunulmuştur. Modellerde kullanılan sargı donatısının akma dayanımları sabit olsa da farklı çaplarda ve aralıklarda sargı donatısı kullanımının, farklı geometride tasarlanan betonarme kolon kesitlerinin yanal basınç dayanımını etkilediği sonucu elde edilmiştir. Sargı donatı sayısı (x ve y yönünde sargı donatı kol sayısı) veya sargı donatı oranının artırılmasının aynı etkiyi yaratması beklenmelidir, dolayısıyla sargı donatısı artırıldığında da kesit taşıma gücü artması olağandır. Sargı donatı aralığı azaltıldıkça ve sargı donatısı çapı arttıkça, sargı etkisi dolayısı ile süneklilik artmaktadır.

Farklı geometri ve parametrelerde tasarlanan betonarme kolon modellerinin Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerine göre hesaplanan sargılı beton dayanımı ve maksimum gerilmeye karşı gelen birim kısalma değerlerinin farklı olduğu sonucu elde edilmiştir. Dairesel en-kesitli betonarme kolon kesitlerinde her iki modelden hesaplanan sargılı beton basınç dayanımlarında yakın sonuçlar elde edilmiştir. Hesaplanan sargılı beton basınç dayanımları arasındaki fark, kare ve dikdörtgen en-kesitli kolon modellerinde dairesel en-kesitli kolon modeline göre daha fazla olduğu görülmektedir. Tasarlanan betonarme kolon modellerinde her iki modele göre hesaplanan sargılı beton dayanımlarında en çok fark, dikdörtgen en-kesitli kolon modellerinde elde edilmiştir. Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerinde sargılı beton basınç dayanımları arasındaki farklar, kolon kesitlerindeki sargı donatısı çapı ve aralığına göre değişmektedir. Bu farklılıklar sargı donatı çapının artması ile artmakta ve sargı donatısı aralığının artması ile azalmaktadır. 8mm çapındaki sargı donatısı için sargılı beton basınç dayanımları arasındaki farklar azalmakta ve 50 mm sargı donatısı aralığı için iki modelden elde edilen farklar artmaktadır. Sabit sargı donatısı çapı ve aralığı için tasarlanan betonarme kolon modellerinde farklı boyuna donatı oranları için Mander ve diğ. (1988a), Saatçioğlu ve Ravzi (1992) modellerinden hesaplanan sargılı beton basınç dayanımları arasında ihmal edilecek kadar küçük farklılıklar görülmüştür. Boyuna donatı oranının artması sargılı beton basınç dayanımı, maksimum gerilmeye karşı gelen birim kısalma ve kolon kesitlerinin sünekliğinde önemli etkiye sahip olmadığı görülmüştür.

#### **KAYNAKLAR (REFERENCES)**

Canbay, E., Ersoy, U., Özcebe, G., Sucuoğlu, H., Wasti, S. T., 2010, *Binalar İçin Deprem Mühendisliği Temel İlkeler*, ISBN: 9799789944070, ODTÜ, Akademik Kitaplar Yayınevi, Ankara.

- Ersoy, U., Özcebe, G., 2012, *Betonarme 1*, İSBN: 978-975-503-215-31, Evrim Yayınevi ve Bilgisayar San. Tic. Ltd. Şti, İstanbul.
- Foroughi, S., 2018, Sargılı ve Sargısız Betonarme Elemanların Davranışlarının Gerilme-Şekil Değiştirme Modellerinin Araştırılması, Doktora Semineri, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya/Türkiye.
- Hognestad, E., 1951, "A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members", *University of Illinois Engineering Exp.* Station. Bulletin. Vol. 49, No. 22.
- Mander, J. B., 1983, *Seismic design of bridge piers*, PhD Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R., 1988a, "Theoretical stress-strain model for confined concrete", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, pp.1804-1826.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N. Park, R., 1988b, "Observed stress-strain behavior of confined concrete", *Journal of Structural Engineering*. Vol. 114, No. 8, pp. 1827-1849.
- Saatcioglu, M., Ravzi, S. R., 1992, "Strength and ductility of confined concrete", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 6, pp.1590-1607.
- TBDY, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- TS500, 2000, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standardları Enstitüsü, TSE, Ankara.



# PRODUCTION AND STRUCTURAL ANALYSIS OF Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> INCORPORATED EPOXY COMPOSITES

# <sup>1,2</sup>Derya KAPUSUZ

<sup>1</sup>Gaziantep University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 27310, Gaziantep, TURKEY <sup>2</sup>Drexel University, Department of Materials Science and Engineering, 19104, Philadelphia, USA <sup>1,2</sup>dkapusuz@gantep.edu.tr

# (Geliş/Received: 13.01.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.03.2019)

ABSTRACT: Epoxy resins have been extensively used in a wide range of industrial applications owing to their superior properties like good electrical insulation, adhesiveness and high mechanical strength. They have moderate viscosity and curing temperatures lower than 200 °C, thus have been ideal candidates for protective coatings in electronic, aerospace and marine industries. In order to combine superior properties of epoxy with enhanced mechanical strength for bulk, structural applications, various nanomaterials including clays and graphite have been incorporated into epoxy resins. However, sufficient level of enhancement in mechanical strength and thermal resistance could not be provided due to excessive agglomeration of nanosized particles. Agglomeration limited the wettability of particles by the monomer, leading to decreased polymerization efficiency at the polymer-reinforcer interface. In this study, the aluminum layer in Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> (MAX (312); ternary carbides), was chemically etched leaving a layered structure possessing graphene-like electrical conductivity (Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) with good mechanical strength. Both, MAX and MXene were incorporated into epoxy monomer at identical ratios. The incorporation of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> layers resulted in disappearance of (002) peak in XRD analysis. This indicated the delamination of MXene layers inside epoxy matrix. The glass transition temperature (Tg) of epoxy shifted from 175 to 180 °C and 183 °C by 4 wt. % incorporation of MAX and MXene respectively. The microhardness increased from 18.9  $\pm$  1.8 to 27.5  $\pm$  5 when 4 wt. % MXene, and to 20.6  $\pm$  2.9 when 4 wt. % MAX incorporated. This study indicates that it is possible to produce highly reinforced MXene/epoxy composites and use them in structural applications while the agglomeration is prevented.

Key Words: Layered carbide, epoxy, MAX, MXene, composite

# Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> Katkılanmış Epoksi Kompozitlerinin Üretimi

**ÖZ**: Epoksi reçineler, iyi elektrik yalıtımı, yüksek yapışkanlık ve mekanik mukavemet gibi üstün özellikleri sayesinde endüstride geniş bir uygulama yelpazesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Orta derecede viskoziteye ve 200 °C' nin altında kür sıcaklığına sahiptirler. Böylece elektronik, havacılık ve denizcilik endüstrilerinde koruyucu kaplamalar için ideal adaylardır. Epoksinin üstün özelliklerini yüksek mekanik mukavemet ile birleştirerek yapısal uygulamalarda kullanabilmek için killer ve grafit gibi çeşitli nanomalzemeler ile desteklenmiştir. Bununla birlikte, nano-boyutlu yapıların aşırı topaklanması nedeniyle mekanik özellikler ve ısıl dayanımında yeterli artış sağlanamanıştır. Topaklanma parçacıkların monomer tarafından ıslatılabilirliğini sınırlandırarak polimer matris ile destek parçacıkları ara yüzünde polimerleşme verimini düşürmüştür. Bu çalışmada, Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> (MAX 312) yapısında bulunan alüminyum (Al) tabakası dağlanarak grafen benzeri iletkenliğe sahip 2-boyutlu Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> tabakaları (MXene) elde edilmiştir. Her iki yapı, MAX ve MXene, eşit oranlarda epoksi monomerine katkılanarak polimerleştirilmiştir. Bu durum, MXene tabakalarının delamine olduğunun göstergesidir. Ağ. %4 oranında MAX ve MXene katkılandığında epoksinin cam geçiş sıcaklığı (T<sub>g</sub>) 173 °C'den sırasıyla 180 ve

183 °C'ye yükselmiştir. Ağ. %4 oranında MXene katkılandığında epoksi mikrosertliği 18,9  $\pm$  1,8 HV'den 27,5  $\pm$  5 HV'e, Ağ. %4 oranında MAX katkılandığında ise 20,6  $\pm$  2,9 HV'e yükselmiştir. Bu çalışma topaklanmanın önlenerek, yüksek katkılı MXene/epoksi kompozitlerinin üretilebileceğini ve yapısal uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir.

#### Anahtar Kelimeler: Tabakalı karbür, epoksi, MAX, MXene, kompozit

#### INTRODUCTION

Epoxy resins are thermosetting polymers which contain two or more epoxide groups in their structure (Jin, Li, and Park 2015; May 1987). They can be produced via heat or light curing reactions using a broad range of curing agents (Jin, Li, and Park 2015). Until recently, owing to their low cost, ease of processability, adhesiveness, electrical insulation and thermal resistance, they have been used in various industrial applications including production of hardware components like integrated circuits, transistors or capacitors and as general-purpose protective coatings or structural glues in automotive, aerospace and marine applications (Liu et al. 2018; Wang et al. 2016).

Incorporation of inorganic particles such as nanoparticles, fibers, nano-clays and graphene toughened epoxy resins by particle bridging, crack path deflection and pinning mechanisms (Kumar and Roy 2018; Wang, Jin, and Song 2013; Li et al. 2017; Poonpipat et al. 2017; Yousri, Abdellatif, and Bassioni 2018). However, as the content of reinforcing fillers increased to enhance mechanical properties further, dispersion problems arose. Researchers showed that small amount of nano fillers could provide similar mechanical strength to that of conventional micro/macro fillers (usually required >10 wt. %) provided at higher ratios (Yousri, Abdellatif, and Bassioni 2018). Then by incorporating nanofillers, larger amount of particle surfaces could be wet by the epoxy monomer, leading to decrease in cured polymer chain mobility under stress. Accordingly, the thermomechanical properties were notably enhanced.

Among various nanofillers, influence of incorporating clays (Laouchedi, Bezzazi, and Aribi 2017) and carbonaceous materials (Choi 2013) (carbon fibers, graphite, graphene layers, etc.) into epoxy matrix were one step ahead. As clay layers were incorporated, they were dispersed in the matrix and monomer could wet the surfaces between the layers. The incorporation of clay (i.2 montmorillonite) layer stacks (intercalative) limited the mobility of polymer chains and led to increase in thermomechanical performance, dimensional stability, toughness and stiffness (Souza et al. 2014). Carbon fibers with high strength were incorporated into epoxy and composites were usually used more extensively in structural applications due to their superior specific stiffness and strength properties (Choi 2013). However, the entanglement of fibers, thereby aggregation in the matrix was a notable problem that needed to be addressed. Carbon nanotubes, having a nanoscale morphology combined with good conductivity, were also used for the reinforcement of epoxy. Similarly, they showed low dispersibility and weak mechanical interlock at the tube-epoxy matrix interface (Sowichai et al. 2012; Prolongo et al. 2013). Graphene, atomically thin layers of carbon, has superior surface area (2630 m<sup>2</sup>/g) and thermal conductivity (5000 W/m\*s) (Rao et al. 2009; Kausar, Anwar, and Muhammad 2016). Owing to its good thermomechanical performance, epoxy/graphene composites were also produced. However, graphene layers started to aggregate in epoxy after 2 wt. % incorporation. It has been stated by many researchers that it is not possible to disperse graphene platelets in polymers including epoxy, without applying chemical functionalizations (Xu et al. 2012; Atif, Shyha, and Inam 2016; Radovic et al. 2011). In this regard, the need for epoxy nanofillers which allow for high loading percentages without agglomeration and provide clay morphology with carbon-like properties was undeniable.

MAX phases (M<sub>n+1</sub>AX<sub>n</sub>, n=1,2 or 3) are a large family of layered, hexagonal early-transition-metal carbides/nitrides, in which M denotes for an early transition metal, A for an A-group (13 and 14) element and X for carbon (C) or nitrogen (N). MAX phases are ideal fillers for developing mechanically strong structural polymer matrix composites. They are elastically stiff and electrically and thermally conductive. They combine ease of machinability with excellent mechanical properties, especially at high temperatures

(>1000 °C) MXenes, on the other hand, are a large family 2 dimensional (2D) carbides/nitrides which are derived from MAX phases through wet chemical etching of A layer (Anasori, Lukatskaya, and Gogotsi 2017). They possess excellent electrical conductivity, a clay-like texture when intercalated with water and small ions, opening the door for a wide range of applications including molecular delivery and structural composites (Barsoum, 2013).

MXenes exhibit graphene-like electrical performance and layered morphology like clays, allowing to combine advantageous properties of graphene and clays. Compared to graphene, they offer wider range of properties on account of their surface terminations formed during or after etching. When incorporated in epoxy and well-dispersed, -OH, -O, -F terminations (T<sub>x</sub>) can provide different properties and/or a strong mechanical interlock at the matrix-filler interface simultaneously. As the most commonly investigated MXene, Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-(T<sub>x</sub>), has proven its electrical performance comparable to graphene, which is strongly related to its surface terminations (Anasori, Lukatskaya, and Gogotsi 2017).

Many critical questions related to epoxy-filler interface are required to be answered. Comparing the interface behavior of a strong carbide material at bulk and layered morphologies can be the first step to understand the influence of interface morphology on structure and to deliver enhanced thermomechanical behavior (Zaman et al. 2015). In this respect, this study involves the production of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXenes through well-known lithium fluoride/hydrogen chloride (LiF/HCl) etching procedure from MAX phases. As-prepared etched powders were composed of Ti-C octahedral layers which were held into each other from one side, forming an accordion-like shape. This type of structure was referred to "multi-layered" (mL-) Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>. mL-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> particles were incorporated into epoxy matrix, structural properties, thermomechanical behavior and hardness of the composites were tested and compared with neat and Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> (MAX) incorporated epoxy.

This study is the first report to investigate and compare the microstructure and thermomechanical properties of  $Ti_3AlC_2$  and  $Ti_3C_2T_x$  incorporated epoxy composites. It shows that viscous epoxy resins can be reinforced with mL-  $Ti_3C_2T_x$  and form exfoliated composites without agglomeration of the  $Ti_3C_2T_x$  layers in the epoxy matrix. Moreover, a scalable method combining mL-MXene washing, filtering and drying is reported for the first time in literature. The total time used for 2 g of MAX was 40 min at the longest, whereas it takes 100-120 min when centrifugal washing was performed.

## MATERIALS AND METHODS

#### Synthesis of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> (MAX)

The typical route for the production of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> particles were described previously (Ghidiu et al. 2014) (Naguib et al. 2011). Typically, commercially provided Ti<sub>2</sub>AlC and TiC powders were dry-mixed at stoichiometric ratio (1:1, molar) for 24 h using ball mills. After that, this powder mixture was sintered at 1350°C for 2 h under argon atmosphere. The sintered bulk sample was crushed, powdered and sieved to 200 mesh.

## Etching of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>

In MAX phases, M-A bonds are chemically more reactive than M-X bonds, so that it is possible to leach Al layers between Ti-C layers (Poonpipat et al. 2017). For selective etching of Al layers, a well-understood etching method of MAX phases was followed (Ghidiu et al. 2014). Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> particles were poured into a LiF (Alfa Aesar) dissolved acidic aqueous solution. Typical etching solution contained 20 mL of aqueous HCl (6M). As LiF powders were dissolved completely in the acidic solution, Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> particles were added. The LiF: Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> molar ratio was kept as 1:5. The solution was stirred at ambient conditions (25±3 °C, 1 atm). Then, etching reaction was performed at 40 °C for 24 h under continuous stirring at 500 rpm. After the reaction was complete, the etched powders were separated from the acidic solution and washed using a vacuum-operated Buchner funnel system. In a typical washing procedure, 20 mL of etched solution was poured onto the filter paper (0.22 µm) placed in the Buchner funnel. First, the acidic liquid was separated from particles by vacuuming. The precipitates were collected on the filter

paper inside the funnel. Then, 250 mL of distilled water was poured inside the funnel in 50 mL volumetric parts (5x) and each 50 mL solution was refiltered for 5 min. Then, identical procedure was repeated for 100 mL of ethanol (99 %, 2x). After washing was completed, particles were vacuum-filtered until the supernatant pH reached 7.0 ( $\approx$ 20 min) and completely dried. Then, the particles were kept under vacuum until use. Using this simple, funnel washing strategy eliminated the centrifuging step and provided faster washing and separation of precipitated mL-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> directly from the remaining acid solution and unwanted by-products.

#### Production of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>/mL-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> Embedded Epoxy Composites

In a typical composite preparation procedure, certain amounts of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> and Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> particles (Table 1) were added into 8 g of EPON 828® and mixed in a centrifugal mixer (Thinky® ARE-250) for 10 min at 2000 rpm, followed by 5 min of degassing. After homogeneous mixture was obtained, 2.24 g of PACM® (Amicure, bis-(p-aminocyclohexyl) methane) was added into the mixture and further mixed for 20 min at 2000 rpm, without degassing. The mixture was then transferred to the rubber mold and cured at 95 °C for 2 h, post cured at 160 °C for 2 h. Heat curing was performed under atmospheric conditions.

#### **Characterization and Testing**

Powder X-ray diffraction (XRD) analysis was performed on Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> and Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> particles and on MAX/MXene composite formulations given in **Table 1**. Prior to analysis, composites were ground to 200 mesh powders. XRD analyses were carried out by Rigaku X-ray diffractometer (Rigaku SmartLab®, Drexel University) in Bragg-Brentano mode using monochromatic Cu K-alpha rays (1.54056°A). The scan step was 0.04°/s and the powders were scanned at 2 theta of 5-65° at 1 s/° resolution.

Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>, Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> particles and cross section surfaces of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> embedded epoxy composites were analyzed using scanning electron microscope (SEM, Zeiss Supra 50VP ®with EDS (Oxford), Drexel University). The operating voltage was 10 kV and samples were coated with 10 nm of platinum before analysis.

Thermomechanical strength of the Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> embedded epoxy composites was tested using single cantilever measurement DMA system (TA Instruments®, Drexel University) with a heating rate of 5°C/min. Each sample was heated up to 300 °C.

A Vickers microhardness tester (AOB Test Systems<sup>®</sup>, Gaziantep University) was used to evaluate hardness of composites. Prior to tests, the surfaces were manually ground using 600 and 1000 grit SiC papers. In each test, 40 measurements were performed on top and bottom surfaces (20 per each surface) using 1 kg load with 10 s dwell time.

Composite	EPON 828/PACM (g/g)	Ti3AlC2 (g)	Ti3C2 (g)	Reinforcer/ EPON 828 (wt. %)
Neat Epoxy		-	-	-
MAX-1		0.04	-	0.4
MAX-2		0.21	-	2
MAX-3	8.0/2.24	0.43	-	4
ML-1		-	0.04	0.4
ML-2		-	0.21	2
ML-3		-	0.43	4

**Table 1.** MAX and mL-MXene reinforced composite formulations

## **RESULTS AND DISCUSSION**

#### Structural Analysis of MAX and MXene

In Figure 1a, XRD pattern of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> (before etching, MAX) is shown with that of mL-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> particles (after etching, mL-MXene). Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> and mL-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> morphologies are shown in Figure 1b-c. Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> (MAX) exhibited typical diffraction peaks at 9.52°, 19.00°, 34.12°, 35.03°, 36.72°, 38.98°, 41.66°, 48.41°, 56.41° and 60.80° corresponding to (002), (004), (101), (102), (103), (104), (105), (107), (109) and (1010) crystallographic planes, respectively (JCPDS #01-074-8806). After etching of the Al layers from the MAX structure, almost all of the (h0l) peaks disappeared as also observed by the previous researchers (Ghidiu et al. 2014). The intensity of (00l) peaks diminished/disappeared and a new, intense peak at 6.53° formed. Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> is composed of Al layers, which are sandwiched between the octahedral Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> layers. The diffraction of crystalline (00l) planes in the XRD pattern corresponds to the presence of these octahedral layers. As Al layers in MAX phase were eliminated by etching, the interplanar (d-) spacing between Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> layers increased, leaving an accordion-like morphology as shown in Figure 1c. This separation of layers is reflected to the XRD pattern as shifting of the (00l) peaks to smaller degrees in compliance with the Bragg's Law, which states that the diffraction angle decreases by the increase in the d-spacing. This shifting is clearly observed in (002) plane. The newly formed peak at 6.53° is the shifted (002) peak after etching (referred as (002)\*). The calculated "c" lattice parameter was 2.74 nm, which was identical to the one obtained by previously performed centrifugal washing (Ghidiu et. al. 2014). Considering an equivalent amount of increase must occur in interplanar spacing between (004) planes based on crystallographic principles, a shifted, less intense (004) peak was expected to present at angles smaller than 5°. The positions of the remaining (h0l) peaks (i.e. (104)) on the other hand, were not shifted since they correspond to the inner crystal structure of octahedral layers.

In this etching and washing procedure that uses the Buchner Funnel, most of the (*h0l*) peaks were eliminated indicating that the procedure was an effective washing procedure to remove unreacted (or unetched) MAX from the solution. This study shows for the first time that funnel filtering is a time-efficient technique for high capacity-MXene washing and drying per unit time. In a completely etched structure, the (002) peak at 9.52° completely disappears (Ghidiu et al. 2014). Then, the presence of a small non-shifted (002) together with (104) peak after etching, indicate that Buchner funnel washing was effective on elimination of etched Al products from mL-MXene, but more prolonged time of reaction was required for complete etching of Al layers when MAX-to-LiF molar ratio of 1:5 is used. In the conventional washing procedure, the total time for washing, filtering and centrifuging to get dry mL-MXene was approximately 100 min. In the current study, using the Buchner funnel, etched MXene solution (containing unreacted LiF and by-products) could be washed, filtered and dried totally in 40 min. Moreover, the method can provide control of d-spacing (002) by intercalating more/less water between the layers during washing in the funnel. Controlling the d-spacing by changing the washing parameters can allow for delivery of various molecules within MXenes. The method prevented powder losses which occur in the conventional method upon solution transfer from tube to disposal during centrifugation.



**Figure 1 a)** XRD patterns of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> (before etching) and Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (after etching), and SEM images of **b**) Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> and **c**) Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> particles. Inset XRD patterns show the zoomed versions of the patterns in 2-theta of 5-12° range (*left*) indicating the shifting of the (002) from 9.52° to 6.53° ((002)\*), and in 2-theta of 33-45° range (*right*) indicating the disappearance of (*h*0*l*) peaks.

#### Structural Analysis of the Composites

As shown in Figure 1b-c, the MAX particles are bulk, chunky particles containing Al between  $Ti_3C_2$  layers, whereas mL- $Ti_3C_2$  particles are accordion-like structures in which the layers are attached to each other on one side, containing large spaces in between. Incorporating these materials separately into epoxy monomer using an identical procedure can reveal the efficiency of epoxy chain and the  $Ti_3C_2$  layer interaction at the interface and final composite properties can be analyzed comparably.

There are two important structural concerns about layered composites in literature, which are the delamination and the agglomeration of the fillers. Delamination on one hand, can provide strong mechanical interlock leading to enhanced degree of mechanical strength only when the agglomeration is avoided. Agglomeration is the reason behind the reinforcement threshold that is observed in most nanocomposite formulations. Due to increased level of agglomeration of nano-fillers in the matrix, the mechanical properties could be enhanced only up to a specific limit, unless chemically functionalized (Srivastava and Pandey 2019) (Ma et al. 2010).

XRD is an efficient tool to determine the delamination degree of layered fillers in polymer matrices. Normally, the disappearance of characteristic diffraction peaks of layers in the composite XRD pattern can demonstrate whether the layers are fully exfoliated in the matrix or not. In this study, the increased d-spacing (i.e. dow) after Al layer etching provides as extra spacing for monomer wetting, thereby a strong mechanical interlock at the cured filler-polymer matrix interface is expected. Epoxy resins are amorphous; there should be no peaks present in their XRD pattern except for the wide hump that is characteristic for an amorphous structure. The XRD peaks of filler can then be easily distinguished in the composite XRD and the position of the (001) peaks can disclose intercalation behavior of monomer between the spaces (further shifting to lower degrees) and complete delamination of the octahedral layers (disappearance of (001)). In **Figure 2a-g**, the XRD patterns of the composites are shown with respect to that of neat epoxy.



**Figure 2.** XRD patterns of MAX (MAX1/3) and MXene composites (ML1/3) compared to neat epoxy; a) Neat epoxy b) MAX1, c) MAX2, d) MAX3, e) ML1, f) ML2, g) ML3 and Schematic representation of h) Epoxy/MAX, i) Epoxy/MXene composite structures.

Neat epoxy resin (Figure 2a) showed a wide diffraction peak with a maximum around 18° due to the scattering of cured epoxy molecules revealing its completely amorphous nature. Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> and mL-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> particles were incorporated into epoxy at 0.4, 2 and 4 wt. % (Table 1). When Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> particles were incorporated at 0.4 and 2 wt. % (MAX1-2; Figure 2b-c), the peak at 9.52° which is attributed to the (002) plane of unetched MAX, was slightly present and the amorphous hump of epoxy was lost. As mentioned before, composites were ground into submicron powders prior to XRD analysis. The presence of a broadened (002) peak of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> suggests that the Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> particles (as composites were ground into -200 mesh powders) were coated with a thin layer of epoxy, such that the diffraction could occur majorly from disorted (002) cystallographic planes. As the reinforcement was increased to 4 wt. % (MAX3; Figure 2d), the (002) peak of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> particles disappeared, only a small (006) peak (at 27.42°; $\nabla$ ) was recognized with the epoxy hump. The increase in scattering of X-rays from epoxy suggests that surfaces of the octahedral layers of MAX were chemically attracted to epoxy chains. Epoxy-Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> surface attraction (surface was made up of octahedral Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> layers) was an expected as yet uncleared result in literature since Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> layers were previously shown to functionalized with -O, -OH, -F surface terminations (Anasori, Lukatskaya, and Gogotsi 2017). It should and will be analyzed with an appropriate experimental set up in future studies. As the reinforcement increased, more epoxy reacted with, and covered the distorted Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> layer surfaces leading to thickening of the epoxy layer on the layer surfaces and increased the intensity of the amorphous hump (Figure 2h). Two conclusions can be drawn from these XRD results. First, MAX particles were neither broken nor delaminated inside the amorphous matrix at any ratio. Secondly, increasing the amount of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> increased the epoxy wetting in the epoxy/MAX composites.

For mL-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> incorporated composites (Figure 2e-g), at all ratios of incorporation, only the amorphous hump was present; neither the (002)\* peak of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (at 6.53°) nor the (002) peak of unetched Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> (at 9.52°) were not seen. Note that (006) peak was not observable in the XRD pattern of the mL-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> before incorporation into epoxy because of its very small relative intensity. But a slight (006) peak at its original position was present at ML3 composite again indicating a neglectable amount of unreacted MAX in the matrix. These XRD patterns clearly demonstrate that ML1/3 composites are exfoliated composites rather than intercalated. As the interlayer spacing of (*001*) surfaces are filled with epoxy in intercalated composites, the broad amorphous peak as well as (*001*) peak with lowered intensity can be seen in the XRD spectra. But, if the layers are separated completely as in this case; namely exfoliation or delamination, (*002*)\* peak is lost and only epoxy peak present, since all the layers are separated and covered with a thick layer of epoxy (**Figure 2i**).

XRD analysis revealed the delamination of mL-  $Ti_3C_2$  layers during composite processing. The interlocking efficiency between the epoxy monomer and the  $Ti_3AlC_2$  and mL- $Ti_3C_2$  layers were analyzed by DMA analysis. In **Figure 3**, the storage modulus (G'), loss modulus (G'') and tan delta ( $\delta$ , loss factor)
of composites are compared with neat epoxy, as a function of temperature. The interlocking degree between the filler surfaces and the polymer is directly related to the crosslinking efficiency, which can be investigated by comparing G', G'', tan  $\delta$  and the Tg value. The G' is the parameter to indicate the ability of the polymer to store deformation energy in an elastic manner. The higher the crosslinking, the higher is the G'. G'' on the other hand, is a measure of energy dissipated as heat, attributed to the viscous behavior of the polymer. Tan delta ( $\delta$ ), loss factor, is the ratio of G'' to G'. A high tan  $\delta$  value indicates that the polymer has a high, nonelastic strain component, while a low value indicates a structure which is more elastic. Tg is the maxima of the temperature range, where the polymer structure changes from rigid to a rubbery state (Ehrenstein, Riedel, and Trawiel 2012). Tg is directly influenced by the polymer chain mobility and the crosslinking density. As the epoxy chain movement is restricted (e.g. by fillers), the crosslinking density decreases. In a polymeric network where crosslinking density is low, it is easier to change from a solid to rubbery state (Ehrenstein, Riedel, and Trawiel 2012).

In this study, low-temperature G' (i.e. 50  $^{\circ}$ C; G'<sub>50</sub>) of composites was compared with neat epoxy. The  $G'_{50}$  of epoxy was 1800 MPa.  $G'_{50}$  of MAX1-3 composites were 655, 648 and 2200 MPa, respectively (Figure 3a-d). Only when 4 wt. % Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> particles were incorporated, the G'; the capacity of the composite to support mechanical loads with recoverable viscoelastic deformation, increased. This increase in G' from 1800 to 2200 MPa with 4 wt. % Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> incorporation was probably due to the interfacial interactions between octahedral layer surfaces of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> and epoxy chains, which inturn restricted the movement of the local epoxy chains around the layers. The negative effect of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> incorporation (MAX1,2) at low ratios was due to the agglomeration of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> particles in some regions of the matrix. The difference in the regional movement in the matrix, the phase separation, was evident from the two peaks occurred in the G" (Figure 3b, at 86 and 175 °C). The agglomerated volume of particles inhibited complete wetting of particles by the epoxy monomer. In these regions, presence of MAX particles were dominant; epoxy chains could not crosslink and were highly mobile, thereby the G' decreased (G'' increased) remarkably. This result was also supported by the XRD patterns of MAX1 and 2, in which diffraction from the distorted Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> surfaces (00l) was dominant over amorphous epoxy hump. As Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> content was increased further (MAX2), this phase separation started to disappear and at 4 wt. % incorporaton (MAX3), the structure became highly crosslinked.

 $G'_{50}$  value of MXene composites (ML1-3) were 1000, 1205, 2200 MPa, respectively. Similar to MAX composites, only when 4 wt. % mL-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> was reinforced, the G' value increased remarkably compared to neat epoxy. The value of G' at 4 wt. % of MAX and MXene incorporation was equivalent (2200 MPa), pointing out that unmodified Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> surfaces in MAX was equivalently reactive upon epoxy interaction to the (-O, -OH, -F) terminated Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> surfaces, which is formed after etching.

As mentioned before,  $T_g$  is a direct indication of the degree of crosslinking in a polymer. It is reliable to measure  $T_g$  from tan  $\delta$  (Souza et al. 2014). It has been stated that rigid fillers increase the G' of the polymer and shift  $T_g$  to higher temperatures by restricting the movement of the chains (Kaya, Tanoğlu, and Okur 2008; Kausar, Anwar, and Muhammad 2016; Choi 2013; Rao et al. 2009). As the polymer chain movement is restricted, the polymer would be more stable against fracture. Thereby, incorporation of rigid MAX and MXene fillers increased the G' of the polymer and shifted  $T_g$  to higher temperatures by restricting the movement of the epoxy chains. By incorporating 0.4, 2 and 4 wt. % Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> to epoxy,  $T_g$ decreased from 175 °C to 90 °C then increased to 160 °C and 180 °C, respectively. By incorporating 0.4, 2 and 4 wt. % mL-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> to epoxy,  $T_g$  decreased from 175 °C to 160 °C then increased to 173 °C and 180 °C, respectively. Segmental movement of the epoxy chains were restricted in filler accumulated regions, causing the formation of two distinct peaks in the G''. However, mL-MXenes were distributed more homogeneously in the structure, which is why a second  $T_g$  peak was not observed in ML1 composite compared to the identical incorporation of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> (MAX1).



**Figure 3. a-g)** Storage modulus (G') and Loss modulus (G'') variation of a) neat epoxy, b) MAX1, c) MAX2, d) MAX3, e) ML1, f) ML2 and g) ML3 composites and h) Tan delta (δ) variation in Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> (MAX-1/3) and mL-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (ML-1/3) -epoxy composites as a function of temperature.

In summary, epoxy was reinforced with mL-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (MXene) at 0.4, 2, and 4 wt. % and the cured composite structure was compared to epoxy reinforced with Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> (MAX) at identical ratios. In MAX

structure, the interplanar spacing between the octahedral Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> layers were filled with Al, so that the epoxy could not wet between the layers. But in MXene composites, the layers were exfoliated during processing leading to good dispersion inside the monomer and could be filled with epoxy providing a homogeneous microstructure, which was deducted from the absence of segmental differences in epoxy chain movement during heating of MXene composites. XRD analysis showed that the MXene layers were delaminated during processing, possibly due to harsh high-shear mixing conditions. T<sub>g</sub> of epoxy shifted from 175 to 180 and 183 °C by 4 wt. % incorporation of MAX and mL-MXene. To get these enhanced structural properties, neither MAX, nor MXene particles were chemically treated, showing the potential of MXene composites to serve as alternative materials to currently used structural composites in the industry.

#### Morphology and Microhardness of the Composite Surfaces

Until recently, the best candidate for reinforcing polymers have been recognized as the clays with nano layer thicknesses and graphene. However, it has been shown that the surfaces of both clay layers and graphene must be chemically modified before incorporation, since they stack face to face in the agglomerated tactoids making them incompatible with hydrophobic polymers (Zabihi et al. 2018). Results in this study showed that MAX and MXenes can be incorporated into epoxy and be well-dispersed without chemical treatment, probably owing to the interactions of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> surfaces with epoxy chains. In **Figure 4a-c**, the representative SEM micrographs of the composites are shown.



Figure 4. SEM micrographs of a,b) MAX3, c) ML3 composites d) Vickers microhardness of MAX1-3 and ML1-3 composites

The SEM image of the bulk MAX3 composite in Figure 4a, reveals that the large, agglomerated chunks of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> are well-dispersed inside the epoxy matrix. The size of the agglomerates were roughly larger than 10 µm. XRD analysis revealed that, when ground into particles, the X-rays were majorly diffracted from the epoxy at 4 wt. % incorporation. This means that the epoxy chains covered and strongly bound to the Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> particles as illustrated in Figure 2b. In Figure 4b, one of the agglomerates inside a crack is clearly observed. Despite the fact that large aggomerates are stress concentrators thereby critically harmful

for the mechanical properties upon crack propagation, they can act as crack deflection or bridging particles upon plastic deformation up to certain degree of reinforcement. In Figure 4d, this positive effect of MAX incorporation on surface hardness of epoxy is obvious. At low reinforcement (0.4 wt. %), the Vickers microhardness was not influenced remarkably. Two different  $T_g$  values obtained by DMA analysis indicated a phase separation inside this composite matrix. Since the ratio of MAX particles was low, the major portion of the hardness was influenced by the epoxy matrix. The microhardness of neat epoxy was  $18.9 \pm 1.85$  HV. Because of the segmental differences in the composite structure, hardness decreased to 17.9  $\pm 1.68$  HV at 0.4 wt. % Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> content. As the MAX content increased to 2 wt. %, the microhardness value increased (MAX1) to  $20.85 \pm 4.71$  HV (MAX2). As the reinforcement was increased further to 4 wt. %, hardness did not increase further ; average hardness was identical with a lower standard deviation (20.65  $\pm 2.96$  HV). A narrower deviation from the average is a sign of enhanced homogeneity in dispersion of the particles in the matrix, which was clear in Figure 4a.

In Figure 4c, the SEM image of the bulk ML3 composite is shown. The white areas are the cross sections of the Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> layers. As the figure shows it clearly, the mL-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> layers were almost completely exfoliated (delaminated) upon composite processing, probably during high-shear mixing. Exfoliation was also indicated by the XRD analysis; from the disappearance of the (002) peak corresponding to the interplanar spacing between the (002) octahedral multilayers. The peak is expected to shift to lower degrees as the space between the layers is filled with epoxy. But, if the layers are completely seperated, the peak signal is completely lost like in ML3 composite in Figure 4c. As the Figure 4c shows, the composite microstructure was relatively homogeneous, the exfoliated layers were well-dispersed. This homogeneous structure influenced microhardness remarkably. The microhardness of epoxy first did not change (18.8  $\pm$  1.70 HV) then incressed to 23.25  $\pm$  4.65 HV and 27.45  $\pm$  5.05 HV, by 0.4, 2 and 4 wt. % mL-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> addition, respectively. The incorporation of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> layers enhanced the resistance of the epoxy surface to mechanical loading.

#### CONCLUSIONS

This study was performed to show the potential use of MXenes as epoxy reinforcer for structural applications that necessitate good mechanical properties without sacrificing from advantageous properties of epoxy. Results demonstrated that both MAX and MXene particles could be incorporated up to 4 wt. % and interlocked with epoxy chains at the interface without necessitating of the MAX/MXene chemical functionalization as such in clay/ and graphene/epoxy composites. The applied high-shear mixing caused in-situ delamination of mL-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> layers and dispersion in the matrix without agglomeration. The enhancement in storage modulus and  $T_g$  was slightly more pronounced in MAX composites, however, incorporation of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> layers into epoxy at identical ratios influenced hardness remarkably more than Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> particles. Storage modulus was the measure of elastic resistance of the material to mechanical loading. Tg was a measure to compare the crosslinking efficiency. These two properties were related to each other and both depend on the inhibition of polymer chain movement during heating/mechanical loading. So, even in agglomerated form, large MAX particles could act as particulate blocks against polymer chain movement owing to the increased crosslinking between the monomer and Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> particle surfaces. This increased the storage modulus of epoxy from 1800 to 2200 MPa by 4 wt. % reinforcement. A similar effect was observed in ML composites. The amount of increase in T<sub>g</sub> was evident but lower in MXene incorporated composites compared to that of MAX incorporated. The microhardness increased 46 % only by 4 wt. % mL-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> reinforcement. These improvements confirmed the potential use of two-dimensional layered carbides in overcoming the shortcomings of epoxy matrix in structural composites. Owing to the attractive features of the Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> layers, these composites carry potential to be used in a diverse area of applications including electromagnetic shielding, aerospace and marine applications.

## ACKNOWLEDGEMENT

Author acknowledges Prof. Dr. Michel W. Barsoum and TUBITAK 2214 (International Research Fellowship) Program. Author also acknowledges Prof. Dr. Giuseppe Palmese for providing DMA analysis equipment.

## REFERENCES

- Anasori, Babak, Maria R Lukatskaya, and Yury Gogotsi. 2017. '2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage', *Nature Reviews Materials*, 2: 16098.
- Atif, Rasheed, Islam Shyha, and Fawad Inam. 2016. 'Mechanical, thermal, and electrical properties of graphene-epoxy nanocomposites—A review', *Polymers*, 8: 281.
- Barsoum, M. W., 2013, *MAX Phases: Properties of Machinable Ternary Carbides and Nitrides*, Wiley-VCH Verlag GmBH & Co., Weinheim, Germany.
- Choi, Ilbeom. 2013. 'Surface modification of carbon fiber/epoxy composites with randomly oriented aramid fiber felt for adhesion strength enhancement', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 48: 1-8.
- Ehrenstein, Gottfried W, Gabriela Riedel, and Pia Trawiel. 2012. *Thermal analysis of plastics: theory and practice* (Carl Hanser Verlag GmbH Co KG).
- Ghidiu, Michael, Maria R Lukatskaya, Meng-Qiang Zhao, Yury Gogotsi, and Michel W Barsoum. 2014. 'Conductive two-dimensional titanium carbide 'clay'with high volumetric capacitance', *Nature*, 516: 78.
- Jin, Fan-Long, Xiang Li, and Soo-Jin Park. 2015. 'Synthesis and application of epoxy resins: A review', Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 29: 1-11.
- Kausar, Ayesha, Zanib Anwar, and Bakhtiar Muhammad. 2016. 'Recent developments in epoxy/graphite, epoxy/graphene, and epoxy/graphene nanoplatelet composites: a comparative review', Polymer-Plastics Technology and Engineering, 55: 1192-210.
- Kaya, Elcin, Metin Tanoğlu, and Salih Okur. 2008. 'Layered clay/epoxy nanocomposites: Thermomechanical, flame retardancy, and optical properties', *Journal of applied polymer science*, 109: 834-40.
- Kumar, Abhishek, and Samit Roy. 2018. 'Characterization of mixed mode fracture properties of nanographene reinforced epoxy and Mode I delamination of its carbon fiber composite', *Composites Part B: Engineering*, 134: 98-105.
- Laouchedi, Dalila, Boudjema Bezzazi, and Chouaib Aribi. 2017. 'Elaboration and characterization of composite material based on epoxy resin and clay fillers', *Journal of applied research and technology*, 15: 190-204.
- Li, Yan, Han Zhang, Harshit Porwal, Zhaohui Huang, Emiliano Bilotti, and Ton Peijs. 2017. 'Mechanical, electrical and thermal properties of in-situ exfoliated graphene/epoxy nanocomposites', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 95: 229-36.
- Liu, Shan, Venkata S Chevali, Zhiguang Xu, David Hui, and Hao Wang. 2018. 'A review of extending performance of epoxy resins using carbon nanomaterials', *Composites Part B: Engineering*, 136: 197-214.
- Ma, Peng-Cheng, Shan-Yin Mo, Ben-Zhong Tang, and Jang-Kyo Kim. 2010. 'Dispersion, interfacial interaction and re-agglomeration of functionalized carbon nanotubes in epoxy composites', *Carbon*, 48: 1824-34.
- May, Clayton. 1987. Epoxy resins: chemistry and technology (CRC press).
- Naguib, Michael, Murat Kurtoglu, Volker Presser, Jun Lu, Junjie Niu, Min Heon, Lars Hultman, Yury Gogotsi, and Michel W. Barsoum. 2011. 'Two-Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti3AlC2', Advanced Materials, 23: 4248-53.

- Poonpipat, Yanika, Kritsanachai Leelachai, Raymond A Pearson, and Peerapan Dittanet. 2017. 'Fracture behavior of silica nanoparticles reinforced rubber/epoxy composite', *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36: 1156-67.
- Prolongo, SG, BG Meliton, G Del Rosario, and A Ureña. 2013. 'New alignment procedure of magnetite– CNT hybrid nanofillers on epoxy bulk resin with permanent magnets', *Composites Part B: Engineering*, 46: 166-72.
- Radovic, Ljubisa R, Alejandro Suarez, Fernando Vallejos-Burgos, and Jorge O Sofo. 2011. 'Oxygen migration on the graphene surface. 2. Thermochemistry of basal-plane diffusion (hopping)', *Carbon*, 49: 4226-38.
- Rao, C. N. R., A. K. Sood, K. S. Subrahmanyam, and A. Govindaraj. 2009. 'Graphene: The New Two-Dimensional Nanomaterial', *Angewandte Chemie International Edition*, 48: 7752-77.
- Souza, Virgínia S, Otávio Bianchi, Martha FS Lima, and Raquel Santos Mauler. 2014. 'Morphological, thermomechanical and thermal behavior of epoxy/MMT nanocomposites', *Journal of Non-Crystalline Solids*, 400: 58-66.
- Sowichai, Kanokwan, Sitthisuntorn Supothina, On-uma Nimittrakoolchai, Takafumi Seto, Yoshio Otani, and Tawatchai Charinpanitkul. 2012. 'Facile method to prepare magnetic multi-walled carbon nanotubes by in situ co-precipitation route', *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18: 1568-71.
- Srivastava, Shakun, and Anjaney Pandey. 2019. 'Mechanical behavior and thermal stability of ultrasonically synthesized halloysite-epoxy composite', *Composites Communications*, 11: 39-44.
- Wang, Fuzhong, Lawrence T Drzal, Yan Qin, and Zhixiong Huang. 2016. 'Enhancement of fracture toughness, mechanical and thermal properties of rubber/epoxy composites by incorporation of graphene nanoplatelets', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 87: 10-22.
- Wang, Xiao, Jie Jin, and Mo Song. 2013. 'An investigation of the mechanism of graphene toughening epoxy', *Carbon*, 65: 324-33.
- Xu, Peng, James Loomis, Ben King, and Balaji Panchapakesan. 2012. 'Synergy among binary (MWNT, SLG) nano-carbons in polymer nano-composites: a Raman study', *Nanotechnology*, 23: 315706.
- Yousri, Omar M, Mohamed Hazem Abdellatif, and Ghada Bassioni. 2018. 'Effect of Al \$\$ \_ {2} \mathrm {O} \_ {3} \$\$ Nanoparticles on the Mechanical and Physical Properties of Epoxy Composite', *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43: 1511-17.
- Zabihi, Omid, Mojtaba Ahmadi, Saeid Nikafshar, Karthik Chandrakumar Preyeswary, and Minoo Naebe. 2018. 'A technical review on epoxy-clay nanocomposites: Structure, properties, and their applications in fiber reinforced composites', *Composites Part B: Engineering*, 135: 1-24.
- Zaman, Izzuddin, Fethma M Nor, Bukhari Manshoor, Amir Khalid, and Sherif Araby. 2015. 'Influence of interface on Epoxy/clay nanocomposites: 1. Morphology structure', *Procedia Manufacturing*, 2: 17-22.



# HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENEN ÇİNKO STANAT (Zn2SnO4) NANOPARÇACIKLARIN FOTOKATALİTİK PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

<sup>1</sup>Elif BAYLAN, <sup>2</sup>Ayse CULU, <sup>3</sup>Mehmet YILDIRIM, <sup>4</sup>Teoman ÖZTÜRK, <sup>5</sup>Savaş SÖNMEZOGLU, <sup>6</sup>Ozlem ALTINTAS YILDIRIM

<sup>1, 3, 6</sup> Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE
<sup>2, 5</sup>Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Karaman, TÜRKİYE
<sup>2,5</sup> Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Nanoteknoloji Ar-Ge Laboratuarı, Karaman, TÜRKİYE
<sup>4</sup> Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Konya, TÜRKİYE

<sup>1</sup>baylanelif35@gmail.com, <sup>2</sup>ayseculu95@gmail.com, <sup>3</sup>myildirim@ktun.edu.tr, <sup>4</sup>teomanozturk@selcuk.edu.tr, <sup>5</sup>svssonmezoglu@kmu.edu.tr, <sup>6</sup>oayildirim@ktun.edu.tr

## (Geliş/Received: 19.02.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 12.03.2019)

**ÖZ:** Çinko stanat (Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub>, ZTO) nanoparçacıklar hidrotermal yöntemle 180 °C ve 24 saatte başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. Sentezlenen nanoparçacıkların yapısal, morfolojik ve optik özellikleri X-ışını kırınımı, Taramalı elektron mikroskobu (SEM), Fourier Dönüşümlü Infrared Spektrofotometre spektrumu ve UV-Visible spektroskopisi ile karakterize edilmiştir. X-ışını kırınım methodu sonucunda elde edilen pik desenleri incelendiğinde sentezlenen yapının ters kübik spinel formda oluştuğu ve ortalama kristal boyutunun ~22 nm olduğu belirlenmiştir. SEM görüntüleri, sentezlenen nanoparçacıkların küresel morfolojide oluştuğunu göstermektedir. Aynı zamanda sentezlenen Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> nanoparçacıkların Rodamin B (RhB) boyar maddesinin bozunumuna karşı davranışı UV ve görünür ışık altında incelenmiştir. 180 dakikalık yüksek şiddetli UV ışığına maruz bırakılma sonucunda RhB boya çözeltisinin % 82'si bozunurken daha düşük enerjili görünür ışık altında 420 dakikalık ışıma sonucunda da % 86'sının bozunduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çinko stanat, Fotokatalitik aktivite, Hidrotermal metot, Rodamin B.

## Investigation of Photocatalitic Performance of Zinc Stanate (Zn2SnO4) Nanoparticles Synthesized by Hydrotermal Method

**ABSTRACT:** Zinc stanate (Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub>, ZTO) nanoparticles were successfully synthesized by hydrothermal method in 180 °C and 24 hours. Structural, morphological and optical properties of synthesized nanoparticles were characterized by X-ray diffraction (XRD), Scanning electron microscopy (SEM), Fourier Transform Infrared Spectrophotometer and UV-Visible spectroscopy. When the XRD was used, the inverted cubic spinel structure was determined with ~ 22 nm the mean crystal size. According to the SEM images, the nanoparticles have spherical morphology. At the same time, the behavior of synthesized ZTO nanoparticles against degradation of Rhodamine B (RhB) dye was investigated under UV and visible light. As a result of exposure to 180 minutes of high intensity UV light, 82% of the RhB dye solution was degraded, while 86% degradation was observed as a result of 420 minutes of radiation under lower energy visible light.

*Keywords:* Zinc stanate, Photocatalytic activate, Hydrothermal method, Rhodamine B.

## **GİRİŞ** (INTRODUCTION)

Yarı iletken malzemeler özellikle optik ve elektronik uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. İşlemciler, güneş panelleri, kapasitörler, varistörler, sensörler gibi pek çok alanda kullanılan yarı iletkenlerin önemi gittikçe artmaktadır. Fotokatalitik uygulamalarda da katalist olarak sıkça kullanılan yarı iletkenler kirletilen atık suların temizlenmesi adına oldukça önemlidir.

Literatürde CdSe, TiO<sub>2</sub>, ZnO gibi iki bileşenli yarı iletkenlerin fotokatalitik uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmektedir [Yıldırım ve ark., 2013]. Günümüzde daha yüksek kimyasal kararlılığa sahip olmalarından dolayı fotokatalitik uygulamalarda iki bileşenli sistemlerden üç bileşenli sistemlere bir geçiş söz konusudur. Zn2SnO4 yapısı geniş bant aralığına sahip (3.6 eV), n tipi ve üç bileşenli (II-IV-VI oksitleri - A<sup>II</sup><sub>2</sub>B<sup>IV</sup>O<sub>4</sub>) bir yarı iletkendir. Yüksek elektrik iletkenliği ve kimyasal kararlılığıyla birlikte sergilediği üstün optik özelliklerinden dolayı son zamanlarda oldukça ilgi çekmektedir [Wang ve ark., 2017]. Gösterdiği üstün özelliklerden dolayı sensörlerde, lityum iyon bataryalarında, sinerjik alev geciktiricilerinde, boya hassaslaştırılmış güneş pillerinde, fotokatalitik uygulamalarda, kaplama malzemesi olarak antibakteriyel uygulamalar gibi pek çok alanda kullanılmaktadır [Lou ve ark., 2006]. Bu parçacıkların sentezlenmesinde de pek çok farklı yöntem kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık katı hal reaksiyonları [Mihaiu ve ark., 2011], birlikte çöktürme [Wang ve ark., 2007], sol-jel [Fu ve ark., 2002], termal plazma [Lin ve ark., 2009] ve hidrotermal yöntem [Annamalai ve ark., 2010] gibi yöntemler Zn2SnO4 nanoparçacıkların sentezinde kullanılmaktadır. Tüm bu sentez yöntemleri arasında hidrotermal yöntem düşük sıcaklıklarda ve yüksek basınçta ZTO nanoparçacıkların yüksek bir verimlilikte sentezlenmesini sağladığından dolayı ekonomik bir yöntemdir [Liu ve ark., 2014]. Ayrıca, hidrotermal yöntem sıvı ortamındaki birleşenlerin kimyasal ve fiziksel dönüşümler ile istenilen fiziksel ve kimyasal özellikteki toz sentezine olanak sağlarken yine sentezlenecek tozların boyut ve morfolojilerinin kontrol edilmesine de imkan vermektedir.

Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> nanoparçacıkların son zamanlarda kullanılmaya başlandığı uygulamalardan biri de fotokatalitik uygulamalardır. Bu uygulamalarda temel amaç değişik ortamlarda (hava, su vb.) bulunan kirlilikleri bir ışın kaynağı kullanarak zararsız hale dönüştürebilmektir. Bu amaç doğrultusunda kullanılan yarı iletken malzeme sahip olduğu bant aralığından daha büyük dalga boyuna sahip olan bir UV veya görünür ışık tarafından uyarılır. Uyarılan elektronların değerlik bandından iletkenlik bandına geçmesi ile bir elektriksel iletkenlik oluşur. Böylece yarı iletken malzemede bir elektron-boşluk çifti oluşur. Oluşan bu elektron-boşluk çiftleri malzemenin yüzeyine ulaştığında fotobozunum gerçekleşmeye başlar. Bunun sonucunda da zararlı olan organik kimyasal atıklar zararsız bir yapıya (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) dönüşmektedir.

Bu çalışmada yüksek saflığa sahip olan Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> nanoparçacıkların hidrotermal yöntem ile 180°C'de 24 saatte sentezlenmiştir. Ardından bu parçacıkların fotokatalitik aktivitesi RhB boyar maddesine karşı UV ve görünür ışık altında incelenmiştir.

#### DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

Bu çalışma kapsamında yüksek saflıktaki Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> nanoparçacıkların hidrotermal yöntem ile sentezlenmesi sırasında kullanılan kimyasallar Çizelge 1'de verilmiştir.

10010 1. 1/1	e list of the chemiculs used	in the experiments.		
Kimyasalın Adı	Formülü	Saflık Değeri	Markası	
Çinko asetat dihidrat	C4H6O4Zn.2H2O	% 99.0	Aldrich	
Kalay (IV) klorit pentahidrat	CI4Sn.5H2O	% 98.0	Aldrich	
Sodyum hidroksit	NaOH	≥% 97	Merck	

**Çizelge 1.** Deney sırasında kullanılan kimyasalların listesi *Table 1. The list of the chemicals used in the experiments.* 

#### Zn2SnO4 (ZTO) Nanoparçacıkların Sentezi (Synthesis of Zn2SnO4 (ZTO) Nanoparticles)

Yukarıda Çizelge 1'de verilen öncül kimyasallardan çinko, kalay ve sodyum hidroksit tuzlarının mol oranları Zn:Sn:OH 2:1:9 [Annamalai, Carvalho ve 2010] olacak şekilde gereken çinko asetat tuzu 40 mL deiyonize su içerisinde, oda sıcaklığında manyetik karıştırıcı yardımıyla yaklaşık 2 saat boyunca karıştırılarak homojen bir solüsyon eldesi sağlanmıştır. Ardından ayrı bir beherde gereken miktarda kalay klorit pentahidrat tuzu yine 40 mL deiyonize su içerisinde oda sıcaklığında 1 saat karıştırılarak homojen ve şeffaf bir solüsyon elde edilmiştir. Daha sonra kalay solüsyonunun tamamı damla damla çinko solüsyonunun üzerine ilave edilmiştir. Bu ilavenin sonucunda beyaz renkte Zn-Sn sulu çözeltisi elde edilmiş olup bu çözeltinin pH'1 2.36 olarak ölçülmüştür. Nihai solüsyonun pH değerinin ayarlanması amacıyla kullanılacak olan 2 M' lık sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlanan sodyum hidroksit sulu çözeltisi çinko- kalay çözeltisinin üzerine damla damla ve oldukça yavaş bir şekilde güçlü karıştırma altında damlatılarak ana solüsyonun pH değeri 8 olarak ayarlanmıştır.

Hazırlanan solüsyon dolum kapasitesi % 75 olan teflona aktarılıp oradan da hidrotermal ünitedeki otoklav içerisine yerleştirilmiştir. Reaksiyon sıcaklığı ve süresi sırasıyla 180 °C ve 24 saat [Wang ve ark., 2015] olacak şekilde ayarlandıktan sonra ünite çalıştırılarak reaksiyon başlatılmıştır.24 saatin ardından kapatılan ünitenin oda sıcaklığına doğal koşullarda soğuması beklendikten sonra sistem açılıp teflon kabın tabanına çökelen parçacıklara sırasıyla santrifüj ile ayırma, distile su ile yıkama ve kurutma işlemleri uygulanmıştır. Ardından katı parçacıklar 100 °C'deki etüvde 6 saat boyunca kurutma işlemine tabi tutulmuştur.

#### Karakterizasyon (Characterization)

Sentezlenen nanoparçacıkların faz yapısının analizi için X-ışınları kırınım (XRD) analizi uygulanmıştır (Cu Kα, çekim hızı (2 derece/dakika). Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile sentezlenen yapının boyut ve morfoloji analizlerin gerçekleştirilmiştir. Yine sentezlenen Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> nanoparçacıkların kimyasal bağ tipleri Fourier Dönüşümlü Infrared Spektrofotometre (FTIR) spektrumu ile araştırılmıştır. Ardından yarı iletken Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> nanoparçacıkların fotokatalitik aktivitesi, laboratuvar ortamında hazırlanan sulu RhB boyar maddesinin UV ve görünür ışık altındaki bozunum değerlerinin UV-Vis spektrometresi ile ölçümü sonucu belirlenmiştir. Bu ölçümler sırasında UV ışık kaynağı olarak 6 adet Osram 8 watt UVC lambası, görünür ışık kaynağı olarak da 1 adet Philips 23 watt lambası kullanılmıştır. Ayrıca görünür ışık deneylerinde ışığın içindeki UV bölgeyi süzebilmek için 1 adet Thorlabs FEL0400 filtresi kullanılmıştır.

### SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Şekil 1'de hidrotermal yöntem ile 180 °C ve 24 saatte sentezlenen Zn2SnO4 nanoparçacıklara ait X-ışını kırınım deseni verilmektedir. Burada elde edilen kırınım pikleri incelendiğinde yapının faz analizi sonuçlarının Zn2SnO4'ün (JCPDS kart no: 24-1470) verileri ile oldukça örtüştüğü görülmektedir [Ben Ali ve ark., 2015]. XRD analizinde ZnO fazına ait bir pik belirlenmemiştir [Raoufi, 2013]. Ters kübik spinel yapıya sahip olan Zn2SnO4 nanoparçacıkların kafes parametreleri a=b=c=0.8656 nm olarak hesaplanmıştır [Zhu ve ark., 2009]. Debye Scherrer yöntemi kullanılarak Zn2SnO4 nanoparçacıkların kristal boyutu 22,45 nm olarak hesaplanmıştır. XRD analiz sonucuna göre 180 °C ve 24 saatte hidrotermal reaksiyon tamamlanmış olup uygun orandaki kimyasallar (Zn:Sn:OH=2:1:9) ile tepkimenin gerçekleştiği görülmektedir [Fang ve ark., 2001].

Şekil 2'de sentezlenen ZTO nanoparçacıklara ait FTIR spektrumu görülmektedir. Burada sentezlenen Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> yapısına ait olan karakteristik 390 cm<sup>-1</sup>'de Zn-O, 505 cm<sup>-1</sup>'de Sn-O ve 1052 cm<sup>-1</sup>'de ise Sn-O-Zn bağlarına ait pikler mevcuttur [Das ve ark., 2017]. 3500 cm<sup>-1</sup>'de görülen geniş ve düşük şiddetli pik ise numune üretiminden sonra oluşan nemlenmeden kaynaklı –OH bağını göstermektedir.



**Şekil 1.** ZTO nanoparçacıklara ait XRD kırınım deseni. *Figure 1.* XRD pattern of ZTO nanoparticles.



**Higure 2.** I The spectru of 210 nunopurnetes.

Şekil 3'te sentezlenen ZTO nanoparçacıkların düşük ve büyük büyütmeli SEM görüntüleri verilmektedir. Bu görüntüler incelendiğinde, taneciklerin çoğunlukla küresele yakın bir morfolojide olduğu tespit edilmiştir. Parçacıkların ortalama tane boyutu 100 parçacık ile Image J programı kullanılarak hesaplanmış ve 30,1 ± 2.6 nm olarak bulunmuştur. Bu değerin XRD analizi ile belirlenen kristal boyutuna yakın olduğu görülmektedir. Nanoparçacıkların yüzeylerinde yer yer pürüzlülük olduğu ve aynı zamanda parçacıkların bir miktar aglomerasyona uğradığı da görülmektedir.



**Şekil 3.** ZTO nanoparçacıkların a) düşük (100 kx) ve b) büyük (200 kx) büyütmeli SEM görüntüleri. *Figure 3. (a) The low (100 kx) and (b) high magnification (200 kx) SEM image of ZTO nanoparticles.* 

Sentezlenen ZTO nanoparçacıkların fotokatalitik aktivitesinin incelenmesi için UV ışığı altında RhB boyar maddesinin bozunum reaksiyonu zamana bağlı olarak incelenmiştir. İlk olarak 400 ml 5 ppm'lik sulu RhB boya çözeltisi stok olarak hazırlanmıştır. Ve fotokatalitik deneyler RhB çözeltisine ZTO nanoparçacıkların eklenerek ışığa maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Boya çözeltisinden her seferinde 3 mL'lik numune alınarak Cary 5000 UV-Vis-NIR spektrofotometresi ile soğurma spektrumları ölçülmüştür.

ZTO nanoparçacıkların fotokatalitik aktivitelerin belirlenmesi için ilk olarak RhB boyar maddesinin katalizör yokluğunda UV ışığa karşı kararlılığı incelenmiştir. 5 ppm'lik RhB boyar maddesinin 3 saatlik UV ışık altında zamana bağlı bozunum grafiği Şekil 4 (a)'da verilmiştir. Burada RhB sulu çözeltisi 554 nm'de güçlü ve karakteristik bir soğurma piki sergilemiştir [Sung-Suh ve ark., 2004]. Şekil 4 (a)'dan görüldüğü gibi katalizör yokluğunda UVC ışınlaması altında RhB oldukça kararlı davranmaktadır [Ali ve ark., 2015]. Şekil 4 (b)'de ise 30'ar dakikalık aralıklarla alınan boya çözeltileri görülmektedir. Işığa maruz kalma süresi artmasına rağmen boya çözeltisinin renginde bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir. Bu sonuca göre kataliz ilavesinde gözlemlenecek fotokatalitik aktivitenin katalizden kaynaklanacağı sonucuna ulaşılabilir.





RhB boyar maddesinin UV ışığı altında kararlılığı ölçüldükten sonra ZTO nanoparçacıkların fotokatalitik aktivitesinin belirlenmesi için boya çözeltisinin içerisine ZTO katalisti ilave edilmiştir. İlk olarak tutunma-salınma dengesinin sağlanması için katalist eklenmiş sulu boya çözeltisi karanlık ortamda manyetik karıştırıcı yardımıyla 1 saat karıştırılmıştır. 1 saatin sonunda çözeltiden 3 ml'lik numune alınıp santrifüj ile çöktürme işleminden sonra numunenin ölçümü alınmıştır (bu işlem her defasında tekrarlanmıştır) . Işık tarafından bir uyarılma olmadığı için herhangi bir bozunum gözlemlenmemiştir. Ardından ışık açılıp her 15 dakikada bir ölçüm alınarak toplam 180 dakika boyunca ZTO nanoparçacıkların UV ışığı altındaki foto bozunumu incelenmiştir. Şekil 5'te RhB'nin soğurma pik şiddetinin UV ışığa maruz kalma süresi ile azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda boya çözeltisinin 180 dakika sonra renginde meydana gelen değişim de fotoğraflanmış ve Şekil 5 içerisinde verilmiştir. Bu sonuca göre RhB'nin 554 nm'de sergilediği keskin pikinin absorbans değerindeki değişim ilave edilen katalizör maddeden kaynaklanmaktadır [Zhao ve ark., 2016].



**Şekil 5.** ZTO nanoparçacıkların UVC ışığı altında RhB boyar maddesini fotokatalitik bozunum spektrumu. Boya çözeltisinin UVC ışık altında 0. ve 180. dakikada elde edilen görüntüleri şekil içinde verilmiştir.

*Figure 5.* Real-time UV-Vis absorption spectra of the photodegradation of RhB solutions containing ZTO nanoparticles. Appearance of dye solutions are also given as insets in the Figure.

ZTO nanoparçacıkların UV ışığı altındaki fotokatalitik aktivitesinin incelenmesinin ardından görünür ışık altındaki davranışının incelenmesi amacıyla yine 5 ppm'lik RhB sulu çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlanan boya çözeltisinin 20 dakikalık aralıklarla toplam 280 dakika görünür ışığa maruz bırakılarak soğurma spektrumu incelenmiştir. Katalizör yokluğunda görünür ışık altında 280 dakikalık ışıma sonucunda boya çözeltisinin sadece ~% 2'sinin indirgendiği ve RhB'nin görünür ışık altında oldukça kararlı davrandığı belirlenmiştir [Rakibuddin, 2017]. Ardından boya çözeltisine belirli bir miktarda ZTO katalizörü ilave edilerek çözelti toplam 420 dakika görünür ışığa maruz bırakılmıştır. 20 dakikada bir ölçüm alınarak gerçekleştirilen deney sonucunda katalizör varlığında RhB boya çözeltisinin bozunum spektrum grafiği Şekil 6'da verilmektedir. 420 dakika sonunda katalizör varlığında bozunum oranı ~% 86 olarak belirlenmiştir. ZTO nanoparçacıkların görünür ışık altında sergilediği fotokatalitik aktivite UV ışık altında sergilediğinden daha düşüktür. Bu sonuç daha düşük dalga boyuna sahip görünür ışık altında ZTO'nun valans bandından iletkenlik bandına uyarılacak elektron sayısının az olması ve buna bağlı olarak oluşacak elektron-boşluk çifti sayısının az olması ile açıklanabilir. Sonuç olarak hidrotermal yöntemle 180°C, 24 saatte sentezlenen ZTO nanoparçacıkların UV ve görünür ışık altında da iyi fotokatalitik aktivite sergilediğini görülmüştür.



Şekil 6. Görünür ışık altında ZTO nanoparçacıklar içeren RhB çözeltisinin absorpsiyon spektrumunun zamanla değişimi. ZTO nanoparçacıkların ilave edilmedi durumdaki değişim şekil içinde verilmiştir. Figure 6. Photodegradation of MB solutions containing ZTO nanoparticles under Visible light illumination. RhB degradation without catalyst addition is also given as inset in the figure.

#### SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Hidrotermal yöntem kullanılarak Zn2SnO4 nanoparçacıklar başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. XRD sonucuna göre oluşan pikler yapının JCPDS kart verileri ile oldukça örtüşerek hedef malzemenin sentezlendiğini ve başka bir faza ait herhangi bir pik oluşumunun olmadığı gözlemlenmiştir. SEM görüntülerinden sentezlenen nanoparçacıkların ortalama 30,1 ± 2.6 nm tane boyutuna sahip olduğu belirlenmiştir. Başarılı bir şekilde yüksek saflıkta sentezlenen partiküllerin RhB boyar maddesinin boznunumunda fotokatalitik aktivitesinin belirlenmesi amacıyla UV ve görünür ışık altında çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. 180 dakikalık yüksek şiddetli UV ışığına maruz bırakılma sonucunda RhB boya çözeltisinin % 82'sinin indirgendiği, daha düşük enerjili görünür ışık altında 420 dakikalık ışıma sonucunda da % 86'sının indirgendiği belirlenmiştir. Böylece geniş bant aralığına sahip olan ZTO nanoparçacıkların hem UV hem de görünür ışık altında yüksek fotokatalitik aktivite sergilediği gerçekleştirilen deneyler ile belirlenmiştir.

#### KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen 216M011 numaralı COST projesi (aksiyon numarası: CA15114) kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar TÜBİTAK'a finansal desteklerinden dolayı teşekkür eder.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

Ali, M. B., Barka-Bouaifel, F., Elhouichet, H., Sieber, B., Addad, A., Boussekey, L., Férid, M. and Boukherroub, R. 2015. "Hydrothermal synthesis, phase structure, optical and photocatalytic properties of Zn2SnO4 nanoparticles", Journal of Colloid and Interface Science, 457 360-369.

- Annamalai, A., Carvalho, D., Wilson, K. and Lee, M.-J. 2010. "Properties of hydrothermally synthesized Zn2SnO4 nanoparticles using Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> as a novel mineralizer", Materials Characterization, 61 (9), 873-881.
- Ben Ali, M., Barka-Bouaifel, F., Elhouichet, H., Sieber, B., Addad, A., Boussekey, L., Férid, M. and Boukherroub, R. 2015. "Hydrothermal synthesis, phase structure, optical and photocatalytic properties of Zn2SnO4 nanoparticles", Journal of Colloid and Interface Science, 457 360-369.
- Das, P. P., Roy, A., Tathavadekar, M. and Devi, P. S. 2017. "Photovoltaic and photocatalytic performance of electrospun Zn2SnO4 hollow fibers", Applied Catalysis B: Environmental, 203 692-703.
- Fang, J., Huang, A., Zhu, P., Xu, N., Xie, J., Chi, J., Feng, S., Xu, R. and Wu, M. 2001. "Hydrothermal preparation and characterization of Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> particles", Materials Research Bulletin, 36 (7-8), 1391-1397.
- Fu, G., Chen, H., Chen, Z., Zhang, J. and Kohler, H. 2002. "Humidity sensitive characteristics of Zn2SnO4– LiZnVO4 thick films prepared by the sol–gel method", Sensors and Actuators B: Chemical, 81 (2-3), 308-312.
- Lin, H.-F., Liao, S.-C., Hung, S.-W. and Hu, C.-T. 2009. "Thermal plasma synthesis and optical properties of Zn2SnO4 nanopowders", Materials Chemistry and Physics, 117 (1), 9-13.
- Liu, N., Chen, X., Zhang, J. and Schwank, J. W. 2014. "A review on TiO2-based nanotubes synthesized via hydrothermal method: Formation mechanism, structure modification, and photocatalytic applications", Catalysis Today, 225 34-51.
- Lou, X., Jia, X., Xu, J., Liu, S. and Gao, Q. 2006. "Hydrothermal synthesis, characterization and photocatalytic properties of Zn2SnO4 nanocrystal", Materials Science and Engineering: A, 432 (1-2), 221-225.
- Mihaiu, S., Atkinson, I., Mocioiu, O., Toader, A., Tenea, E. and Zaharescu, M. 2011. "Phase formation mechanism in the ZnO-SnO2 binary system", Rev Roum Chim, 56 (6), 465-472.
- Rakibuddin, M. D. (2017). <u>Fabrication of graphene aerosol hybridized coordination polymer derived</u> <u>CdO/SnO 2 heteronanostructure with improved visible light photocatalytic performance</u>.
- Raoufi, D. 2013. "Synthesis and microstructural properties of ZnO nanoparticles prepared by precipitation method", Renewable Energy, 50 932-937.
- Sung-Suh, H. M., Choi, J. R., Hah, H. J., Koo, S. M. and Bae, Y. C. 2004. "Comparison of Ag deposition effects on the photocatalytic activity of nanoparticulate TiO2 under visible and UV light irradiation", Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 163 (1-2), 37-44.
- Wang, B.-Y., Wang, H.-Y., Ma, Y.-L., Zhao, X.-H., Qi, W. and Jiang, Q.-C. 2015. "Facile synthesis of fine Zn2SnO4 nanoparticles/graphene composites with superior lithium storage performance", Journal of Power Sources, 281 341-349.
- Wang, J., Li, H., Meng, S., Zhang, L., Fu, X. and Chen, S. 2017. "One-pot hydrothermal synthesis of highly efficient SnOx/Zn2SnO4 composite photocatalyst for the degradation of methyl orange and gaseous benzene", Applied Catalysis B: Environmental, 200 19-30.
- Wang, S., Yang, Z., Lu, M., Zhou, Y., Zhou, G., Qiu, Z., Wang, S., Zhang, H. and Zhang, A. 2007. "Coprecipitation synthesis of hollow Zn2SnO4 spheres", Materials Letters, 61 (14-15), 3005-3008.
- Yıldırım, Ö. A., Unalan, H. E. and Durucan, C. 2013. "Highly Efficient Room Temperature Synthesis of Silver-Doped Zinc Oxide (ZnO:Ag) Nanoparticles: Structural, Optical, and Photocatalytic Properties", Journal of the American Ceramic Society, 96 (3), 766-773.
- Zhao, Q., Deng, X., Ding, M., Huang, J., Ju, D. and Xu, X. 2016. "Synthesis of hollow cubic Zn2SnO4 submicrostructures with enhanced photocatalytic performance", Journal of Alloys and Compounds, 671 328-333.
- Zhu, X., Geng, L., Zhang, F., Liu, Y. and Cheng, L. 2009. "Synthesis and performance of Zn2SnO4 as anode materials for lithium ion batteries by hydrothermal method", Journal of Power Sources, 189 (1), 828-831.



# AZ91 Mg ALAŞIMLARINDA KOROZYON DAVRANIŞI-Fe TOLERANS SINIRI ARASINDAKİ İLİŞKİNİN ARAŞTIRILMASI

## <sup>1</sup>Şennur CANDAN, <sup>2</sup>Serdar ÇİM, <sup>3</sup>Seren EMİR, <sup>4</sup>Ercan CANDAN

<sup>1,2,3,4</sup>Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik, TÜRKİYE
<sup>1</sup>sennur.candan@bilecik.edu.tr, <sup>2</sup>serdar.cim@hotmail.com, <sup>3</sup>serenemir@gmail.com, <sup>4</sup>ecandan@yahoo.com

## (Geliş/Received: 20.01.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 13.03.2019)

**ÖZ**: Bu çalışmada, aynı şartlarda üretilmiş (benzer katılaşma hızı ve benzer kimyasal bileşimde) farklı Fe içeriğine (% ağ. 0.025, 0.05, 0.1) sahip AZ91 Mg alaşımlarının korozyon davranışları-Fe tolerans limit değeri arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Numunelerin mikro yapı analizleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X Işını Difraktometre (XRD) kullanılarak yapılmıştır. Korozyon davranışları %3,5 NaCl çözeltisinde, ağırlık kaybı ve potansiyodinamik polarizasyon test yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. Mikroyapı analizlerinde, Fe içeriğinin artması ile yapıdaki "kısmen ayrışmış" veya "lameller ötektik" tipi β fazı morfolojilerinde artış eğiliminin daha fazla olduğu gözlenmiştir. Sonuçlar, AZ91 alaşımı Fe tolerans limit değerinin ~%0.05 olduğunu bu değerden sonra korozyon kaybının eksponansiyel olarak arttığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: AZ91 Mg alaşımı, Mikro yapı, Korozyon

# An Investigation of Relationship Between Corrosion Behaviour- Fe Tolerance Limit in AZ91 Mg Alloys

**ABSTRACT:** In this study, relationship between Corrosion Behaviour-Tolerance Limit of Fe content (0.025, 0.05, 0.1 wt. %) in AZ91 Mg alloys, cast under similar chemical composition and cooling rate, were investigated. The microstructures of Mg alloys were analysed by Scanning Electron Microscopy (SEM) and X Ray Diffractometry (XRD). The corrosion behaviours were evaluated by immersion tests and electrochemical polarization measurements in 3.5 wt. % NaCl solution. Microstructure analysis revealed that the increase of Fe content increased the "partially divorced" or "lamella eutectic" type  $\beta$  phase morphologies in the microstructure. Results indicated that the limit content value of Fe in AZ91 alloys was ~0.05 wt. % above which the corrosion loss had increased abruptly.

Key Words: AZ91 Mg alloys, Microstructure, Corrosion

## **GİRİŞ** (INTRODUCTION)

Magnezyum (Mg), düşük yoğunluğu nedeniyle telekomünikasyon, mikro elektronik, otomobil ve uzay endüstrisi gibi birçok mühendislik alanında kullanılan en hafif metalik mühendislik malzemesidir (Friedrich ve Mordike, 2006; Ikeo ve diğ., 2015; Luo ve Sachedev, 2012; Pekguleryuz, 2013). Düşük toksik özelliği nedeniyle, Mg aynı zamanda biyo-uyumlu ve biyo-bozunur bir metaldir. Bu nedenle, ortopedik implant uygulamalarında plaka ve vida üretimi için biyo-bozunur metalik implant malzemeleri olarak gelecekteki kullanılabilme potansiyeli ilgi çekmektedir (Agarwal ve diğ., 2016; Eddy ve diğ., 2013).

Ancak, saf Mg'un dayanımının düşük olması nedeniyle kullanım alanındaki sınırlamalar değişik alaşımların üretilmesine yol açmıştır. Mg'un önemli alaşım grupları Mg-Al, Mg-Zn ve Mg-toprak alkali

metalleri (RE) olarak gruplandırılır. AZ91 Mg alaşımı (Mg-%9Al-%Zn), daha iyi döküm ve mekanik özellikleri nedeniyle diğer Mg alaşımlarına göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Ikeo ve diğ., 2015).

AZ serisi Mg alaşımının korozyon mekanizmalarını anlamaya yönelik son yıllarda çeşitli çalışmalar yayınlanmıştır (Candan, 2017; Candan, 2018a; Candan, 2018b; Esmaily ve diğ., 2017; Gusieva ve diğ, 2015; Salman ve diğ., 2010; Samaniego ve diğ., 2013; Singh ve diğ., 2015; Wang ve diğ., 2012). Bu çalışmalara göre genel olarak Mg ve alaşımlarının zayıf korozyon direnci, yüzeyde oluşan oksit filmlerinin tamamen koruyucu olmaması, özellikle safsızlıkların (Fe, Ni, Cu vb.) veya ikincil fazların (Mg17Alı2, AlMn, Mg2Si vb.) galvanik veya bimetalik korozyona neden olmasına dayandırılmaktadır. Magnezyum alaşımlarının korozyon dayanımını olumsuz etkileyen Fe, Si, Cu ve Ni gibi empürite elementleri alaşımda her zaman bulunur (Pan ve diğ., 2016a; Pan ve diğ., 2016b). Fe empürite elementi, küçük bir miktar bile olsa, Mg alaşımlarının korozyon direncini önemli ölçüde azaltabilmektedir. Özellikle, endüstriyel uygulamalar için Fe'nin tolerans limit değerlerinin bilinmesi maliyet/kalite oranı açısından son derece önemlidir. Literatürde Fe'nin olumsuz etkisi ile ilgili tolerans limit değerleri saf Mg için bulunmasına rağmen (Friedrich, 2006; Polmear, 2006), AZ91 alaşımları için bu bilgi sınırlıdır (Song ve Atrens,1999).

Dolayısıyla bu çalışmada, aynı şartlarda üretilmiş (benzer katılaşma hızı ve benzer kimyasal bileşimde) farklı Fe içeriğine (%0.025, 0.05, 0.1) sahip AZ91 Mg alaşımlarının korozyon davranışları-Fe tolerans limit değeri arasındaki ilişki değerlendirilmiştir.

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL)

AZ91 Mg alaşımlarının üretimi için minimum saflığı %99,90 olan Mg, Al ve Zn külçeler kullanılmıştır. Master alaşımı, saf Mg ve Al alaşımının, 750 °C'de Ar gaz atmosferi altında grafit pota içinde eritilmiş ve dökme demir kalıba (22 mm çap, 220 mm uzunluk) döküm yapılmıştır. Optik emisyon spektrometresi (OES) ile elde edilen alaşımların kimyasal bileşimleri Çizelge l'de gösterilmektedir.

Table 1. Chemical compositions of AZS mig alloys used with our outs 1 e contents (wr. 78)							
Alaşım	Al	Zn	Mn	Fe	Ti	Cu	Mg
AZ91 kontrol	9.1	0.85	0.28	0.018	< 0.002	<20	Kalan
AZ91+0.025Fe	8.90	0.85	0.30	0.022	< 0.002	<20	Kalan
AZ91+0.050Fe	9.00	0.83	0.32	0.045	< 0.002	<20	Kalan
AZ91+0.1Fe	9.15	0.87	0.29	0.12	< 0.002	<20	Kalan

**Çizelge 1.** Deneylerde kullanılan alaşımların kimyasal analizleri (% ağırlıkça oranı) **Table 1.** *Chemical compositions of AZ9 Mg alloys used with various Fe contents (wt. %)* 

17 mm çapında ve 12 mm kalınlığındaki numuneler, döküm alaşımlarından işlenmiştir. Numuneler daha sonra 220, 400, 600, 800 ve 1200'lük zımpara kâğıdı ile zımparalanıp, ardından 1 μm elmas pasta ile parlatılmıştır. Mikroyapı değerlendirmeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Numuneler alkolle temizlendikten ve tartıldıktan sonra 3, 7 ve 21 gün boyunca %3,5 NaCl çözeltisi içinde daldırma testleri yapılmıştır. Daldırma testlerinden sonra, yüzeylerden korozyon ürünlerini uzaklaştırmak için 15 dakika boyunca 200 g/l CrO<sub>3</sub> içeren bir çözelti içinde numuneler temizlenmiş ve hassas terazide tartılmıştır. Korozyon kayıpları, numunelerin toplam yüzey alanı göz önüne alınarak mg/cm<sup>2</sup> biriminde hesaplanmıştır.

Potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri için, 1 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip (numunelerin yüzeyleri, daldırma deneylerinde olduğu gibi hazırlanmıştır) örnekler (yani çalışma elektrotları) bakır kabloya bağlanmış ve bir epoksi reçine tutucuya gömülmüştür. Korozyon incelemelerinde DC105 Korozyon Analiz yazılımına sahip bilgisayar kontrollü Gamry model PC4/300 mA potansiyostat/galvonostat

kullanılmıştır. Karşı elektrot olarak karbon elektrot ve referans elektrot olarak da doygun kalomel elektrot (SCE) kullanılmıştır. Deney çalışmalarının tümünde, öncelikle sistemden akım geçmeksizin, %3,5 NaCl çözeltisinin içine çalışma elektrodunun ve referans elektrodunun daldırılmasından itibaren ikisi arasındaki korozyon potansiyellerinin mV olarak değişimi ilk 45 dk süreyle, zamana karşı ölçülmüştür. Denge potansiyeline (Ekor) ulaştıktan sonra potansiyodinamik polarizasyon eğrileri, -2V -+1V arasında 1mVs<sup>-1</sup> tarama aralığında katodikten anodik yöne doğru kaydedilmiştir. Tafel eğrilerinden korozyon potansiyeli (Ekor) ve korozyon akım yoğunluğu (Ikor) hesaplanmıştır.

#### SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME (RESULTS and DISCUSSION)

#### Mikroyap1 (Micro structure)

AZ91 Mg alaşımının Fe oranına bağlı mikro yapı karşılaştırmaları Şekil 1a-d'de verilmiştir. SEM analizi, AZ91 Mg alaşımının mikro yapısının Mg matris ( $\alpha$ ) fazının yanı sıra ötektik Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> ( $\beta$ ) fazının oluştuğunu göstermiştir. Literatürde (Boby ve diğ., 2015; Srinivasan ve diğ., 2007) ve önceki çalışmalarımızda (Candan, 2018a; Candan ve diğ., 2016; Candan ve diğ., 2011) rapor edildiği gibi,  $\beta$  fazı Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> intermetalik bileşik olarak AZ91 alaşımında  $\alpha$ -Mg matrisinde tane sınırları boyunca oluşmaktadır. Katılaşmanın ilk aşamalarında, yapısal aşırı soğuma ve Zn'nin ayrışma eğilimi nedeniyle dendrit kollarının önündeki Al'ın zenginleşmesi meydana gelir. Ön kısımdaki zenginleşmiş Al,  $\alpha$ -Mg ile ötektik  $\beta$  fazını oluşturur. AZ91 alaşımının mikro yapılarında Fe miktarı arttıkça  $\beta$  fazının kabalaştığı görülmektedir (Şekil 1d).



**Şekil 1.** Farklı Fe içeren AZ91 Mg alaşımlarının (a) AZ91 kontrol, (b) AZ91+0.025Fe, (c) AZ91+0.05Fe ve (d) AZ91+0.1Fe mikro yapı karşılaştırması **Figure 1.** (Mg17Al12 (β)) (*Microstructure of (a) AZ91 control, (b) AZ91*+0.025Fe, (c) AZ91+0.05Fe and (d) AZ91+0.1Fe alloys

Şekil 2'de AZ91 ve AZ91+0.1Fe alaşımlarının X-Ray Difraksiyon analizleri karşılaştırılmıştır. Alaşıma 0.1Fe ilavesi durumunda  $\beta$  fazı pik şiddetlerinde artış olduğu gözlenmektedir. Şekil 3a, b'de verilen yüksek büyütmeli SEM mikro yapıları karşılaştırıldığında, en düşük ve en yüksek Fe içeren AZ91 alaşımları arasındaki fazların morfolojisinde önemli farklılıkların olduğu görülmektedir. SEM mikro yapıları literatür ışığında değerlendirildiğinde (Candan ve diğ., 2016; Candan ve diğ., 2011; Candan, 2009; Dahle ve diğ., 2001; Nave ve diğ., 2000; Zhao ve diğ., 2008), β faz morfolojisinin "kısmen ayrışmış" ve/veya "lameller ötektik" yapıda olduğu görülmektedir. AZ91 kontrol alaşımı ile kıyaslandığında, Fe içeriğinin artması ile alaşımdaki β faz morfolojisinin kısmen ayrışmış veya lameller ötektik morfolojilerinde artış eğilimi gözlenmiştir.



Şekil 2. AZ91 kontrol ve AZ91+0.1Fe alaşımlarının X-Ray Difraksiyon analizleriFigure 2. XRD patterns of AZ91 control and AZ91+0.1Fe alloys



**Şekil 3.** AZ91 kontrol ve AZ91+0,1Fe alaşımlarının ikincil fazlarının morfolojisi *Figure 3.* SEM morphology of secondary phases in (a) AZ91+0.1Fe and (b) AZ91+0.1Fe alloys

#### Korozyon (Corrosion)

3 ve 21 gün %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilen farklı Fe içeren AZ91 alaşımlarının makroskobik fotoğrafları, Şekil 4a-d 'de verilmiştir. Şekil 4'de görüldüğü gibi numunelerin korozyon direncinin Fe artışıyla azaldığı gözlenmiştir. 21. günün sonunda, en fazla korozyona uğrayan alaşımın, en yüksek Fe saflık oranına sahip olan AZ91+0.10Fe alaşımı olduğu ve aynı alaşımın tekrarlanan örneklerinden bazılarının tamamen çözündüğü gözlenmiştir. AZ91 Mg alaşımlarının Fe safsızlık oranlarına karşı korozyon kayıpları Şekil 5'te verilmiştir. Bütün alaşımlarda Fe safsızlık oranındaki artışa bağlı olarak korozyon kaybının arttığı ve yine korozyon kayıpları karşılaştırıldığında, Fe içeriği %0,05'yi aştığında korozyon kaybında ani artış gözlenmiştir.



**Şekil 4.** AZ91 Mg alaşımının Fe oranına bağlı %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilen numunelere ait korozyon sonrası makro yapı fotoğrafları (a) AZ91 kontrol, 3gün, (b) AZ91+0.1Fe, 3 gün, (c) AZ91 kontrol, 21 gün, (d) AZ91+0.1Fe, 21 gün

Figure 4. Macroscopical pictures of Mg alloys exposed to 3.5% NaCl (a) AZ91 control,3 days, (b) AZ91+0.1Fe, 3 days, (c) AZ91 control, 21 days and AZ91+0.1Fe, 21 days

Şekil 6 a-d'de, 3 gün %3,5 NaCl çözeltisine daldırılan AZ91 ve AZ91+0.1Fe alaşımlarının kesit SEM mikro yapıları verilmektedir. SEM analizleri korozyon kaybı sonuçlarını doğrulamakta olup en fazla korozyona uğrayan alaşımın AZ91+0.1Fe olduğunu göstermiştir. AZ91 kontrol numunesinin yüzeyi ile kıyaslandığında, yüksek Fe içeren numunelerin korozyonunun yüzeyden iç kısımlara ilerlediği görülmektedir. Bu durum korozyonun  $\beta$  fazları boyunca iç kısımlara doğru ilerlediğini işaret etmektedir. %0.1Fe içeren numunelerin kesiti incelendiğinde, büyük parçaların  $\beta$  fazını takip ederek yüzeyden ayrıldığı görülmüştür. Mikro yapı bölümünde açıklandığı gibi, yüksek Fe içeriği kaba ötektik ve kısmen ayrışmış  $\beta$  fazlara neden olduğu için, bu fazlar boyunca korozyonun ilerlemesine neden olduğu düşünülmektedir. Daldırma deneyleri sırasında, zamanla katı parçaların yüzeyden ayrıldığı ve dibe biriktiği gözlemlenmiştir ki bu yukarıdaki görüşü desteklemektedir.



**Şekil 5.** AZ91 Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı korozyon kaybı **Figure 5.** *Corrosion loss of AZ91 Mg alloys containing various Fe contents* 



Şekil 6. 3 günlük korozyon ortamında bekletilen (a) AZ91 kontrol ve (b) AZ91+0.1Fe alaşımının Fe oranına bağlı kesit SEM görüntüleri

Figure 6. Cross-sectional SEM images of (a) AZ91 control, (b) AZ91+0.1Fe alloys, immersed for 3 days

AZ91 Mg alaşımının Fe oranına bağlı potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 7'de ve alaşımların, potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon potansiyeli (E<sub>kor</sub>) ve korozyon akımı yoğunluğu (I<sub>kor</sub>) değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. AZ91 kontrol alaşımı ile kıyaslandığında Fe oranının artması ile alaşımların korozyon akımının artığı gözlenmiştir. AZ91 kontrol alaşımının I<sub>kor</sub> değeri (25.43 μA/cm<sup>2</sup>) ve en yüksek Fe içeren AZ91+0.1Fe alaşımının I<sub>kor</sub> değeri (161.10 μA/cm<sup>2</sup>) arasındaki fark 6 kattan fazladır. Fe içeriğine bağlı elektrokimyasal test sonuçları ve korozyon kaybı testleri benzer eğilim göstermektedir.



Şekil 7. AZ91 Mg alaşımının Fe oranına bağlı potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Figure 7. Potentiodynamic polarization curves for AZ91 alloys containing various Fe contents

Çizelge 2. Polarizasyon eğrilerinden elde edilen, AZ91 Mg alaşımlarının Fe oranına bağlı korozyor
potansiyelleri (E <sub>kor</sub> ), korozyon akım yoğunlukları (I <sub>kor</sub> ) ve korozyon hızları (CR)

 Table 2. Corrosion potentiasl (Ecorr), corrosion current densities (Icor) and corrosion rates (CR) values of AZ91 Mg alloys with various Fe contents, derived from the polarization curves

Alaşım	Ekor (V)	Ikor (µA/cm <sup>2</sup> )	CR (mm/y)
AZ91	-1481	25.43	0.58
AZ91+0.025Fe	-1454	36.72	0.84
AZ91+0.050Fe	-1473	54.93	1.26
AZ91+0.10Fe	-1528	161.1	3.68

Fe miktarının artması ile korozyon artışı;

- Intermetaliklerin katot görevi yaparak korozyonu hızlandırıcı etki yapmasına ve
- Mikro yapı içerisindeki β ötektik fazındaki kabalaşmasına dayandırılabilir.

Mg, tüm ikincil fazlardan daha aktiftir ve sonuç olarak Mg matrisi anottur ve tercihen galvanik bir çiftte korozyona uğrar (Song ve diğ., 1998). Galvanik korozyonun temel prensibine göre, galvanik bir hücrede, büyük katoda (intermetalikler) karşın küçük anot ( $\alpha$ –Mg) bulunması anodik metalin daha fazla korozyona uğramasına neden olur. Ayrıca, Fe ilavesi ile hem ağ şeklinde oluşan hem de kabalaşan  $\beta$  fazı korozyonun iç kısımlara ilerlemesini kolaylaştırmaktadır. Dolayısıyla bu da korozyon hızının artması anlamına gelir.

#### SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Tüm alaşımlarda, tane sınırlarında  $\beta$  (Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>) intermetalik fazı oluşmaktadır. Alaşımdaki Fe oranındaki artış  $\beta$ -fazında kabalaşmayı teşvik etmektedir.
- Fe içeriğinin artması ile alaşımdaki β faz morfolojisinin kısmen ayrışmış veya lameller ötektik morfolojilerinde artış eğiliminin daha fazla olduğu gözlenmiştir.
- Polarizasyon testleri, Fe oranı artışı ile Ikor değerlerinin arttığını göstermiştir.

• AZ91 alaşımında Fe tolerans limit değerinin max. %0,05'e kadar olduğu ve bu değerden sonra korozyon kaybının eksponansiyel olarak arttığı gözlenmiştir.

### **TEŞEKKÜR** (ACKOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, 2017-01.BSEU.03-02 nolu BAP projesinden desteklenmiştir.

#### **KAYNAKLAR** (REFERENCES)

- Agarwal, S., Curtin, J., Duffy, B., Jaiswal, S., 2016, "Biodegradable magnesium alloys for orthopaedic applications: A review on corrosion, biocompatibility and surface modifications". *Materials Science and Engineering C*, Cilt 68, ss, 948–963.
- Boby, A., Srinivasan, A., Pillai, U. T. S., Pai, B. C., 2015, "Mechanical characterization and corrosion behavior of newly designed Sn and Y added AZ91 alloy". *Materials and Design*, Cilt 88, ss, 871– 879.
- Candan, S., Candan, E., 2018a, "Comparative study on corrosion behaviors of Mg-Al-Zn alloys". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, Cilt 28, Say1 4, ss, 642–650.
- Candan, Ş., Çim, S., Emir, S., Candan, E., 2018b, "AZ Serisi Mg Alaşımlarının Korozyon Davranışlarında β-Fazının Rolü". *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Cilt 6, Sayı 4, ss, 1139–1162.
- Candan, S., Candan, E., 2017, "A comparative study on corrosion of Mg--Al--Si alloys". Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Cilt 27, Sayı 8, ss, 1725–1734.
- Candan, S., Celik, M., Candan, E., 2016, "Effectiveness of Ti-micro alloying in relation to cooling rate on corrosion of AZ91 Mg alloy". *Journal of Alloys and Compounds*, Cilt 672, ss, 197–203.
- Candan, S., Unal, M., Koc, E., Turen, Y., Candan, E., 2011, "Effects of titanium addition on mechanical and corrosion behaviours of AZ91 magnesium alloy". *Journal of Alloys and Compounds*, Cilt 509, Sayı 5, ss, 1958–1963.
- Candan, S., Unal, M., Turkmen, M., Koc, E., Turen, Y., Candan, E., 2009, "Improvement of mechanical and corrosion properties of magnesium alloy by lead addition". *Materials Science and Engineering A*, Cilt 501, Sayı 1–2, ss, 115–118.
- Dahle, A. K., Lee, Y. C., Nave, M. D., Schaffer, P. L., StJohn, D. H., 2001, "Development of the as-cast microstructure in magnesium-aluminium alloys". *Journal of Light Metals*, Cilt 1, Sayı 1, ss, 61– 72.
- Eddy Jai Poinern, G., Brundavanam, S., Fawcett, D., 2013, "Biomedical Magnesium Alloys: A Review of Material Properties, Surface Modifications and Potential as a Biodegradable Orthopaedic Implant". *American Journal of Biomedical Engineering*, Cilt 2, Sayı 6, ss, 218–240.
- Esmaily, M., Svensson, J. E., Fajardo, S., Birbilis, N., Frankel, G. S., Virtanen, S., Johansson, L. G., 2017, "Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion". *Progress in Materials Science*. Cilt 89, ss, 92–193.
- Friedrich, H. E., Mordike, B. L., 2006, Magnesium technology: Metallurgy, design data, applications. Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications.
- Gusieva, K., Davies, C. H. J., Scully, J. R., & Birbilis, N., 2015, "c". International Materials Reviews. Cilt 60, Sayı 3, ss, 169-194.
- Ikeo, N., Shimizu, J., Ishigaki, C., Sano, Y., Shimizu, Y., Mukai, T., 2015, "Magnesium Technology 2015, ed. by MV Manuel, A. Singh, M. Alderman and NR Neelameggham". Wiley.
- Luo, A. A., Sachdev, A. K., 2012, "Applications of magnesium alloys in automotive engineering". In Advances in wrought magnesium alloys (pp. 393–426). Elsevier.
- Nave, M. D., Dahle, A. K., StJohn, D. H., 2000, "Eutectic Growth Morphologies in Magnesium-Aluminium Alloys". In *Magnesium Technology* 2000 (pp. 233–242).
- Pan, F., Chen, X., Yan, T., Liu, T., Mao, J., Luo, W., Jiang, B., 2016a, "A novel approach to melt purification of magnesium alloys". *Journal of Magnesium and Alloys*, Cilt 4, Sayi 1, ss, 8–14.

- Pan, F., Yang, M., Chen, X., 2016b, "A Review on Casting Magnesium Alloys: Modification of Commercial Alloys and Development of New Alloys". *Journal of Materials Science and Technology*, Cilt 32, Sayi 12, ss, 1211–1221.
- Pekguleryuz, M., 2013, "Alloying behavior of magnesium and alloy design". In *Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy* (pp. 152–196).
- Polmear, I. J., 2006, Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals. Light Alloys.
- Salman, S. A., Ichino, R., Okido, M., 2010, "A comparative electrochemical study of AZ31 and AZ91 magnesium alloy". In *International Journal of Corrosion*.
- Samaniego, A., Llorente, I., Feliu, S., 2013, "Combined effect of composition and surface condition on corrosion behaviour of magnesium alloys AZ31 and AZ61". *Corrosion Science*, Cilt 68, ss, 66– 71.
- Singh, I. B., Singh, M., Das, S., 2015, "A comparative corrosion behavior of Mg, AZ31 and AZ91 alloys in 3.5% NaCl solution". *Journal of Magnesium and Alloys*, Cilt 3, Sayı 2, ss, 142–148.
- Song, G., Atrens, A., Wu, X., Zhang, B., 1998, "Corrosion behaviour of AZ21, AZ501 and AZ91 in Sodium Chloride". *Corrosion Science*, Cilt 40, Sayı 10, ss, 1769–1791.
- Song, G. L., Atrens, A., 1999, "Corrosion mechanisms of magnesium alloys". *Advanced Engineering Materials*, Cilt 1, Sayı 1, ss, 11–33.
- Srinivasan, A., Pillai, U. T. S., Pai, B. C., 2007, "Effect of Pb addition on ageing behavior of AZ91 magnesium alloy". *Materials Science and Engineering A*, Cilt 452, Say1, ss, 87–92.
- Wang, L., Shinohara, T., Zhang, B. P., 2012, "Electrochemical behaviour of AZ61 magnesium alloy in dilute NaCl solutions". *Materials and Design*, Cilt 33, ss, 345–349.
- Wang, T., Kevorkov, D., Mostafa, A., Medraj, M., 2014, "Experimental Investigation of the Phase Equilibria in the Al-Mn-Zn System at 400°C". In *Journal of Materials*.
- Zhao, M. C., Liu, M., Song, G., Atrens, A., 2008, "Influence of the β-phase morphology on the corrosion of the Mg alloy AZ91". *Corrosion Science*, Cilt 50, Sayı 7, ss, 1939–1953.



# EXPERIMENTAL STUDIES ON 1/5 SCALED REINFORCED CONCRETE FRAMES BY USING DIFFERENT STRENGTHENED METHODS

# <sup>1</sup>Fatih Süleyman BALIK, <sup>2</sup>Fatih BAHADIR

<sup>1, 2</sup>Necmettin Erbakan University, Konya Ereğli Kemal Akman Vocational School, Construction Department, Konya, TURKEY <sup>1</sup>fsbalik@erbakan.edu.tr, <sup>2</sup>fatihbahadir24@gmail.com

## (Geliş/Received: 19.09.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 18.03.2019)

**ABSTRACT:** In this experimental study; five RC frames with a scale of 1/5, single spans and two storey were produced so as to reflect the characteristics of existing structures. Two RC frames were used as the reference specimens that without an infill wall and autoclaved aerated concrete blocks (AAC) infilled wall. Three of these RC frames were strengthened as CFS (Cold Formed Steel) drywall system, infill RC shear wall and both external RC shear wall and column jacketing. All specimens produced were tested under reverse cyclic lateral loading and constant vertical loading. Strength, stiffness and energy dissipation capacities of strengthened specimens have occurred higher than reference specimens. But initial stiffness and stiffness at the max lateral load of specimen strengthened with CFS drywall system have occurred lower than reference specimen with AACW.

*Key Words:* Seismic behavior, Strengthening, Reversed cyclic lateral loading, Autoclaved aerated concrete block, Cold formed steel wall system

# 1/5 Ölçekli Betonarme Çerçevelere Farklı Güçlendirme Metotları Uygulanması Üzerine Deneysel Çalışmalar

**ÖZ:** Bu deneysel çalışmada; mevcut yapıların özelliklerini yansıtacak şekilde 1/5 ölçekli, tek açıklıklı ve iki katlı 5 adet betonarme çerçeve üretilmiştir. Bu çerçevelerden 2 adedi referans numune olarak biri boş çerçeve diğeri gazbeton dolgu duvarlı olarak kullanılmıştır. Diğer üç adet betonarme çerçeve ise soğukta şekillendirilmiş çelik (CFS) duvar sistemi, betonarme dolgu duvarlı ve hem düzlem dışı betonarme duvarlı hem de betonarme kolon mantolu olarak güçlendirilmiştir. Üretilen tüm numuneler tersinir-tekrarlanır yatay yük ve sabit düşey yükleme altında test edilmiştir. Test numunelerine ait dayanım, rijitlik ve enerji tüketme kapasiteleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Güçlendirilmiş numunelere ait yatay yük taşıma ve enerji tüketme kapasiteleri, referans numunelere göre daha yüksektir. Fakat soğukta şekillendirilmiş çelik (CFS) duvar sistemi ile güçlendirilen numunenin başlangıç ve maksimum yükteki rijitlik değerleri, gazbeton dolgu duvarlı (AACW) referans numuneninkinden daha düşük olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Deprem davranışı, Güçlendirme, Tersinir-tekrarlanır yatay yükleme, Gazbeton blok, Soğukta şekillendirilmiş çelik duvar sistemi

## INTRODUCTION

Strengthening of existing structures due to possible earthquake in Turkey is an important issue. For this reason, it is necessary find to new strengthening methods and to develop existing methods. Many studies have been carried out on strengthening RC frames with different infill walls until today. These experimental studies have been carried out on strengthening RC infill wall.

In these studies, experiments with different parameters related to the infill walls have been carried out. Higashi et al. (1980) investigated that strengthened RC frames with full infill walls and partial infill walls. They obtained the result that the specimens with the partial infill wall made larger displacements than the specimens with full infill wall. Hayashi et al. (1980) investigated that two methods of strengthening. In the first method, RC frames were strengthened with infill RC shear walls, and the second method was strengthened the surroundings of the columns of RC frames with mortar and welded wire fabrics. These strengthening methods increased the strength and the ductility of RC frames. Altın et al. (1992) investigated that the behaviors of RC frames strengthened with RC infill walls were tested under reversed cyclic loading. The parameters in this study were the reinforcement detail of infill walls, the connection between the frame and the infill walls, and the flexural capacity of columns. The test results showed that, infill walls were increased strength, stiffness and rigidity of RC frames. Ozcebe et al. (2003) investigated that the infill wall thickness, the connection details between infill wall and RC frame and different the beam and column stiffnesses, as a parameter. This study showed that, the strengthening increases the RC frame's lateral load carrying capacity and initial rigidity. Until today, various strengthening methods have been carried out to improve the seismic behaviors of RC frames (Tankut et al., 2005; Baran, 2005; Erdem et al., 2006; Kara and Altin, 2006; Anil and Altin, 2007; Altin et al., 2008; Baran and Tankut, 2011; Baran et al., 2011; Korkmaz et al., 2011; Marius and Valeriu, 2012; Balik, et al, 2018).

It is important to know the behavior of RC frames with brick infill walls in order to clearly demonstrate the seismic contribution of strengthening works to RC frames. For this reason, many experimental works on RC frames with brick infill walls have been made up to this time. Mehrabi et al. (1996) investigated that the influence of masonry infill panels on the seismic performance of reinforced concrete RC frames. The test results showed that indicate that infill panels can significantly improve the performance of RC frames. Buonopane and White (1999) investigated that the earthquake behavior of the system by testing to 1/2 scaled, two-span and two-story brick-filled reinforced concrete frames under dynamic loading. In order to estimate the lateral stiffness and displacement capacity of the system using experimental results, different diagonal compressive member shapes were investigated analytically and the most suitable diagonal compressive member model for experimental results was investigated. Lee and Woo (2002) investigated that the effect of masonry infills on the seismic performance of 1/5 scaled RC frames with non-seismic detailing. The test results showed that, masonry infills were increased strength, stiffness and rigidity of RC frames. Zovkic et al. (2013) investigated that the seismic behaviors of RC frames with 1/2.5 scale the autoclaved aerated concrete blocks infills under constant vertical and cyclic lateral load. The test results showed that RC frames with had much higher stiffness and initial strength than the bare frame. Demirel et al. (2015) investigated that the effect of masonry infills and autoclaved aerated concrete blocks infills on seismic behavior in 1/2 scaled RC frames. They found that the masonry infills increased the base shear force by 43% but the capacity is quickly depleted, and the progressive drift values converge to the bare frame. Besides, the autoclaved aerated concrete blocks infills were increased seismic performance of RC frames. Adding RC infill wall to RC frames are widely used as structural strengthening method. Along with that, various strengthening methods are used at the strengthening of RC structures. Suzuki et al. (2017) investigated that the seismic behaviors of five RC frames with 1/4 scale the masonry infill walls under constant vertical and cyclic lateral load. They used horizontal and vertical stacking of the infill wall as parameters in their experiments. The experimental test results showed that the horizontally stacked infill formed a typical diagonal compressive strut and showed infill seismic performance than higher vertically stacked. Dautaj et al. (2018) investigated that the behaviour of masonry-infilled reinforced concrete (RC) frames under various lateral strength. They found that the type of masonry unit influenced to the failure mechanism of masonry-infilled RC frames.

In many studies, steel plates are often used in steel frames. Steel plates are rarely used for strengthening reinforced concrete frames. Some studies related to this are given below. Elgaaly (1998) investigated that the effect of thin steel plate infills on seismic behavior in <sup>1</sup>/<sub>4</sub> and 1/3 scaled RC frames. The steel plates of these specimens were joined to the RC frames by welding and bolting. All test results indicate that the behaviors of these specimens are stable in the post-buckling domain. Choi and Park (2011)

investigated that the cyclic behavior of walls that are composed of three-story RC frames and thin steel infill plates. The test results show that shear cracking and failure of the column-beam joints were prevented by using the steel infill plates. Pan and Shan (2011) investigated that the structural strength of cold-formed steel wall frames with sheathing under monotonic shear loading. They used three different sheating material and two different thicknesses as thin steel plate in the test specimens. The test results show that the mechanical properties of the sheathing material affect not only the loading capacity of the specimens but also the structural behavior. Kamanli et al. (2011) investigated that 1/3 scaled the specimen of thin steel plate shear wall and other test strengthened specimens under cyclic loading were performed. Experimental results show that there is a significant increase in the horizontal load capacities of the strengthened specimens. In addition, the use and function of the construction is very little affected by such strengthening methods and the strengthening works can be carried out quickly. Akin et al. (2016) tested that 1/3 scaled, one-bay and two-story five RC frames of thin steel plate shear walls. The test results showed that the specimens with the steel plate increased horizontal load-carrying capacities and energy dissipation capacities. Aykac et al. (2017) tested that 12 infill brick walls strengthened with perforated steel plates and a infill brick wall under reversed cyclic loading. Plate thickness, bolt spacing, and anchorages were test variables. According to the results, the strengthened specimens have increased ductility and strength compared to the reference specimen.

Generally, Cold Formed Steel (CFS) profiles are frequently applied in light steel building designs in 1-3 storey buildings. In addition, a lot of work has been done on wood, gypsum and steel plates, which are skeleton structures CFS profiles as sheats of wall materials. Fülöp and Dubina (2004) investigated that the shear behaviour of six wall panel typologies. Different sheats of wall material, door opening and skeleton types were used as test variable. They concluded that the shear-resistance of the test specimens is important both in terms of stiffness and load bearing capacity. Pan and Shan (2011) tested that 13 wall specimens under monotonic shear loading. Three different kinds of sheathing material were used in these wall specimens and these sheathing materials were calcium silicate board, oriented-strand board. In addition, the boards used in these specimens were produced in two different thicknesses. These experiments were shown that the mechanical properties of these sheathing materials affect not only the loading capacity of the specimens, but also the structural behavior. Baran and Alica (2012) tested that thirteen OSB-sheathed CFS wall panel specimens under static lateral load. Different OSB thickness, double-sided sheating, diagonal struts, CFS section size, and screw spacing were used as test parameters. Test results showed that increased screw spacing reduced lateral load carrying and deformation capacity. In addition, diagonal struts added to the panels and increased OSB thickness were increased lateral load carrying capacity and initial stiffness. Ye et al. (2015) tested that the six full-scale walls specimens under cyclic loading. Different sheath materials, stud section and spacing were used as test parameters. The damages and the screw behaviors that occurred during these failure mechanisms were examined in detail. Wang and Ye (2015) investigated that test specimens of nine full-scale CFS shear walls with strengthened end studs under cyclic loading. Different sheating material, stud type and openings were used as test parameters. They have developed a method for shear capacity as a result of their study. The experimental results were compared with the results of this method and the difference was found to be about 8%. Accorti et al. (2016) tested that the 21 CFS shear walls with different bracing systems under vertical and lateral loads. They investigated to the bare steel specimens, the use of trussed bracing, of a trussed frame and of diagonal bracing with flat straps. As result of their work, the performance of CFS walls with diagonal bracing was occurred the best under all aspects than the others specimens. In addition, CFS walls with trussed members are found to be moderate in wind and/or earthquake loads. Mohebbi et al. (2016) investigated that six steel sheathed wall specimens of various cladding configurations were tested under cyclic displacement-control loading. These boards of wall specimens were sheated with the fiber cement and gypsum. As result of their experiments, the use of claddings on one side or both sides of the walls increased the stiffness of the specimens, the shear strength and the energy dissipation capacity. However, these kinds of works are not related strengthening with reinforced concrete frames.

In this study, five RC frames used in the experimental works have been produced with various structural defects, 1/5 scale, 2 storey and one span. Three of these RC frames were strengthened as CFS wall system, infill RC shear wall and both external RC shear wall and column jacketing. In order to determine the seismic contribution of these strengthening works, reference specimens were tested as bare frame and autoclaved aerated concrete block (AAC) infilled wall. All test specimens were tested under reverse cyclic lateral loading and constant vertical loading (Bahadir and Balik, 2017).

## MATERIAL AND METHOD

#### **Details of Test Specimens**

The reinforced concrete frames of specimens were produced to reflect which these deficiencies were commonly observed in the existing reinforced concrete building stock in Turkey (Ozcebe et al., 2004; Yılmaz et al., 2010).

The stirrups of the columns and beams were used 2 mm diameter plain bars by 60 mm spacing and these stirrups placed by 90 degree hooks. In columns and beams, 5 mm diameter longitudinal reinforcement as deformed steel bars were used. In the production of reinforced concrete frames, the average cylinder compressive strength of the concrete was used 10.3 MPa on the 28th day of testing and the concrete of all the frames were cast at the same time. The dimensions and reinforcement details of the reinforced concrete frame of the produced specimens are given in Figure 1. These frames as two stories, 1/5 scaled and one bay were produced.



Figure 1. Dimensional and reinforcement details of the RC frames

Four of five reinforced concrete frames were produced different walls with window openings. These window openings were shifted to the mid-span at stories. The dimensions of window openings at these walls were 210x240 mm. Specimen 1 (RS) constructed was reference bare frame and not contained any infill wall and/or column jackets. Specimen 2 was constructed with autoclaved aerated concrete blocks (AAC) infilled RC frame. At Specimen 2, the dimensions of AAC blocks were used as 120x55x50 mm. The infill AAC walls were tested under diagonal compression. The average diagonal compressive strength of infill autoclaved aerated concrete walls is found as 0.28 MPa. Details of these specimens are given Figure



Figure 2. Dimensions and reinforcements details of Specimen 2

Specimen 3 (DW-SS) was strengthened with single skeleton drywall and 0.3 mm steel sheets. In this specimen, the thickness of the single skeleton drywall system was designed as 26 mm. The CFS profiles used in this wall were anchored to the columns and beams of the frame with M4 bolt bars. The spacing of the anchoring bars of single skeleton drywall system were used 120 mm in the beams, 130 mm in the columns and 120 mm in the base. The anchore holes with a diameter of 5 mm were drilled on the RC frame and these profiles were anchored with epoxy. 0.3 mm thick steel sheets were fixed on the front and back façades of the single skeleton drywall system. Dowel details and dimension details for the Specimen 3 are given in Figure 3.



Figure 3. Dimensions and reinforcements details of Specimen 3

Specimen 4 was strengthened with infill RC shear wall. In these specimens, the thickness of the infill RC shear wall was designed as 40 mm. At the two façades of the infill RC shear wall, plain bars with a diameter of 3 mm spaced at 90 mm were used as square reinforcing mesh. The square reinforcing mesh of infill RC shear wall ratios were  $p_v=0.0041$  in vertical direction and  $p_h=0.0039$  in horizontal direction. At the columns of Specimen 4, the dowel ratio was  $p_{column}=0.0055$ . At the beams of Specimen 4, the dowel ratio

were ρ<sub>beam</sub>=0.0055 and 0.0050. Dowel details, reinforcing mesh and dimension details for Specimen 4 are given in Figure 4.



Figure 4. Dimensions and reinforcements details of Specimen 4

Specimen 5 was strengthened with external shear wall and RC column jacketing. The external shear walls were 40 mm in thickness and constructed at the one external façade of the frames. The connections between the frame and external shear wall were provided with 5 mm diameter deformed bars that were fixed with epoxy to the frame. At the two façades of the external RC shear wall, plain bars with a diameter of 3 mm spaced at 90 mm were used as square reinforcing mesh. The square reinforcing mesh of external RC shear wall ratios were  $\rho_v=0.004$  in vertical direction and  $\rho_h=0.0043$  in horizontal direction. The longitudional reinforcements ratio of the RC column jackets was  $\rho_{jacket}=0.018$ . Dimension details and reinforcing meshs for Specimen 5 are given in Figure 5. Dowel details of Specimen 5 are given in Figure 6.



Figure 5. Dimensions and reinforcements details of Specimen 5



Figure 6. Dowel details of Specimen 5

## **Test Setup**

The experimental setup in which the test specimens are given in Figure 7. During the experiments, total 22 kN axial load was applied to the columns of the specimens. These loads were applied to the columns with a 100 kN capacity hydraulic jack. A special wheel system was used to allow the axial load system to move upper beam of the specimen. According to TEC-2007, at least 10% axial load of design compressive load should be applied for bearing system members that will be dimensioned as a column (Unal et al., 2014). The lateral loading was applied as reversed cyclic loading at the test specimens. This loading was applied by a 200 kN capacity hydraulic jack. During the experimens, 2/3 of the total lateral load to beam of the 2<sup>nd</sup> story and 1/3 of the total lateral load to the beam of the 1st story were applied to test specimens. Total lateral loads and axial load were measured by loadcells. Displacement data of the test specimens were measured by LVDTs at each storey level (Kaya et al., 2018). The values read from load cells and LVDTs were recorded.



Figure 7. Test setup

### Materials

The RC frames of test specimens were designed as low strength concrete to represent the strength of concrete in existing RC structures in Turkey (Kara, 2006). The average compressive strength of concrete used in the production of concrete of RC frames was 13 MPa. Concrete with average compressive strength of 27 MPa was used in the shear walls and column jacketing. Properties of reinforcements used in the test specimens are listed in Table 1. The members of infill walls used in the drywall system are given in Table 2.

Table 1. Properties of reinforcing bars used in the test specimens

Bar diameter (mm)	fsy (MPa)	fsu (MPa)	Bar type
2	981	1242	Plain
3	760	962	Plain
5	639	809	Deformed

## Table 2. Properties of infill wall members at Specimen 3 with drywall system

Detail number	Member name	Geometry and picture	Thickness(mm)	Dimensions(mm)
1	Steel sheet		0.3	780x450
2	CFS-UW profile		0.5	11x26x11
3	Bracket		1	40x40x20
4	CFS-CW profile		0.5	9x25x9
5	M4 bolt bars		-	-
6	Screw with drill bit		_	3.9x13
7	CCW profile	I	0.5	9x24x14

#### **Experimental Study**

#### Specimen 1 (BF-Reference Specimen)

In the experimental program, Specimen 1 was the reference frame, which was tested to observe reference behaviour. It contained no infill wall. Until the end of the experiment, 11 hysteresis cycles were applied to Specimen 1 at both forward and backward. Specimen 1 reached to 9.42 kN max lateral load and +37.96 mm displacement at forward direction. It reached to -10.34 kN max lateral load and -31.05 mm displacement at backward direction. When it reached to lateral load carrying capacity, interstory drift value was 3.3% at forward direction and interstory drift value was 2.5% at backward direction. The hysteresis curves of Specimen 1 are shown in Figure 8.



Figure 8. Hysteresis curves of Specimen 1

The plastic hinge formation occurred in the column-beam joints. Shear and bending cracks were observed on the frame of Specimen 1. The crack patterns of Specimen 1 at the end of the test can be seen in Figure 9.



Figure 9. Photos of Specimen 1 at end of the test (front and back façades)

## Specimen 2 (AACW- Reference Specimen)

Specimen 2 was produced with autoclaved aerated concrete blocks infilled RC frame. Until the end of the experiment, 9 hysteresis cycles were applied to Specimen 2 at forward direction and 8 hysteresis cycles were applied at backward direction. Specimen 2 reached to 15.52 kN max lateral load and +11.86 mm displacement at forward direction and to -18.07 kN max lateral load and -9.43 mm displacement at backward direction. When Specimen 2 reached to lateral load carrying capacity, interstory drift value was 0.9% at forward direction and interstory drift value was 1.3% at backward direction. The hysteresis curves of Specimen 2 are shown in Figure 10.



Figure 10. The hysteresis curves of Specimen 2

The diagonal cracks and damages occurred thoroughly from lower corner of window of 2<sup>nd</sup> story to beam of 1<sup>st</sup> story and from a beam of the 1<sup>st</sup> story to a column of 1<sup>st</sup> story. Further, the diagonal crack occurred thoroughly from lower corner of the window of the 1<sup>st</sup> story to a column-base. The short column behaviour observed at a column of 1st story. A plastic hinge formation was occurred at the lower and upper ends of the other column. The infill walls of 1<sup>st</sup> story collapsed partially at the end of the test. The sliding cracks occurred at the window opening level of 1st story. The plastic hinge formation also observed at a column-beam joint of the 2<sup>nd</sup> story. The crack pattern and damages of Specimen 2 at the end of the test can be seen Figure 11.



Figure 11. Photos of Specimen 2 at the end of the test (front and back façades)

## Specimen 3 (DW)

Specimen 3 was strengthened with single skeleton drywall and steel sheets. Until the end of the test, 10 hysteresis cycles were applied to Specimen 3 at both forward and backward directions. Specimen 3 reached to 17.70 kN max lateral load and +32.68 mm displacement at 7 hysteresis forward cycle and -21.76 kN max. lateral load and -26.36 mm displacement at 9 hysteresis backward cycle. When Specimen 3 reached to max lateral load carrying capacity, interstory drift value was 1.7% at forward direction and interstory drift value was 2.6% at backward direction. The hysteresis curves of this specimen are shown in Figure 12.



Figure 12. The hysteresis curves of Specimen 3

The plastic hinge formation observed at column-beam of 1<sup>st</sup> story and column-base joints. At the displacement of the cycles increased, damages at steel sheets corners of 1<sup>st</sup> story were observed. Furthermore, buckling of the steel sheets were observed more clearly at the 1<sup>st</sup> story. Moreover the corner anchroge bars of 1<sup>st</sup> story were seperated from RC frame. The short column behaviour observed at a column of 1<sup>st</sup> story. The crack pattern and damages of Specimen 3 at the end of the test can be seen Figure 13.



Figure 13. Photos of Specimen 3 at the end of the test (front and back façades)

### Specimen 4 (ISW)

Specimen 4 was strengthened with infill RC shear wall. Until the end of the experiment, 19 hysteresis cycles were applied to Specimen 4 at both forward and backward directions. Specimen 4 reached 53.08 kN lateral load and +17.65 mm displacement at 17 hysteresis forward cycle and -66.03 kN lateral load and -11.16 mm displacement at 17 hysteresis backward cycle. When Specimen 4 reached to max lateral load carrying capacity, interstory drift value was 1.3% at forward direction and interstory drift value was 1.2% at backward direction. The hysteresis curves of Specimen 4 are shown in Figure 14.



Figure 14. The hysteresis curves of Specimen 4

The diagonal cracks and damages occurred thoroughly from the beam-column joint of 1<sup>st</sup> story to base-other column joint on the parts without a window opening of 1<sup>st</sup> story. Further, diagonal cracks occurred thoroughly from the beam-column joint of 2<sup>nd</sup> story to a beam of 1<sup>st</sup> story. The short column behaviour observed in a column of 1<sup>st</sup> story. The plastic hinge formation observed at another column-base of 1<sup>st</sup> story. The crack pattern and damages of Specimen 4 at the end of the test can be seen Figure 15.



Figure 15. Photos of Specimen 4 at the end of the test (front and back façades)

#### Specimen 5 (ESW)

Specimen 5 was strengthened with external RC shear wall and RC column jacket. Until the end of the experiment, 19 hysteresis cycles were applied to Specimen 5 at both forward and backward directions. Specimen 5 reached 75.34 kN lateral load and +24.23 mm displacement at 15 hysteresis forward cycle and -90 kN lateral load and -33.81 mm displacement at 18 hysteresis backward cycle. When Specimen 5 reached to max lateral load carrying capacity, interstory drift value was 3.9% at forward direction and interstory drift value was 2.2% at backward direction. The hysteresis curves of Specimen 5 are shown in Figure 16.


Figure 16. The hysteresis curves of Specimen 5

The main damage was occurred the cracks of X shape between the windows of the first and second story. In addition, shear cracks and damages were formed in the corner of the window of the first story. The cracks and damages of Specimen 5 were given in Figure 17 at the end of the test.



Figure 17. Photos of Specimen 5 at the end of the test (front and back façades)

# COMPARISON OF EXPERIMENTAL RESULTS

The comparison of the behavior of test specimens is prepared in terms of strength, stiffness and energy dissipation (Erdem et al., 2006).

# Strength

Total base shear-top displacement response envelope curves were constructed to evaluate and given in Figure 18. These envelope curves were drawn by connecting the peak points of each hysteretic curve for each specimen (Ha et al., 2018). The lateral load carrying capacities of test specimens are given Table 3.



Figure 18. Total base shear-top displacement envelope curves of all specimens

		Top Displacement		Total Base Shear			
Test Specimens		at Max. Lateral Load (mm)		Max Lateral Load (kN)		Ratio	
Test	Window			<b>-</b> 1	<b>.</b>	<b>-</b> 1	<b>D</b> 1 1
No	Opening	Forward	Backward	Forward	Backward	Forward	Backward
	Туре						
1	RS	38.0	-31.0	9.4	-10.3	1.0	1.0
2	AACW	11.9	-9.4	15.5	-18.1	1.7	1.8
3	DW	32.7	-26.4	17.7	-21.8	1.9	2.1
4	ISW	17.7	-11.2	53.1	-66.0	5.6	6.4
5	ESW	24.2	-33.8	75.3	-90.0	8.0	8.7

Table 3. Summary of test results as the lateral loading capacity

From the inspection of Figure 18 and Table 3, it can be seen that, the lateral load carrying capacities of all infilled frames were considerably greater than the lateral load capacity of Specimen 1. As expected, Specimen 5 strengthened with external shear wall and RC jacket had the highest lateral strength among the other specimens. Specimen 5 carried 8 times more at forward direction and 8.7 times more at backward direction than Specimen 1. The lateral loading capacity of Specimen 5 is increased by 42% at forward direction and 36% in the backward direction according to the Specimen 4. Although the lateral load carrying capacity of Specimen 2 and Specimen 3 were close values at both forward and backward directions, Specimen 3 was measured more displacement.

## Stiffness

The stiffness values of test specimens are given in Table 4. In this table, the initial stiffness and stiffness at maximum load were listed for each of the specimens in forward and backward direction. The initial stiffness were calculated at the load level at which the first bending crack occurred in the experiment of the test specimens. Stiffness at maximum load level is calculated for the forward and backward directions applied to the test specimens. Stiffness in the arithmetic average of the maximum load level are used in the comparison with the Specimen 1 (RS). As expected, Specimen 4 strengthened with infill shear wall had the highest initial stiffness and stiffness of max lateral load among the other specimens. Although the lateral load carrying capacity of Specimen 2 and Specimen 3 were close values at both forward and backward directions, initial stiffness and stiffness of max lateral load of Specimen 3 was the lower than Specimen 2.

T	est Specimens	Initial	at Max. La	Stiffness ateral Load (	Ratio		
TestWindowNoOpening Type	Window Opening Type	Stiffness	Forward	Backward	Average	Initial	Average at Max. Load
1	RS	1.53	0.34	0.33	0.34	1	1
2	AACW	4.76	1.31	1.92	1.61	3.11	4.81
3	DW	2.71	0.17	0.83	0.50	1.77	1.48
4	ISW	9.23	3.01	5.91	4.46	6.03	13.31
5	ESW	6.34	3.11	2.65	2.88	4.15	8.6

Table 4. Summary of test results as stiffness

### **Energy Dissipation**

The different strengthening methods play an important role among the factors affecting energy dissipation capacity of RC frames. The energy dissipated was determined by summing the areas enclosed by hysteretic lateral load displacement curves for each cycle (Carrillo and Alcocer, 2013). The energy dissipation values of test specimens are given in Table 5. Among all strengthened specimens, Specimen 5 dissipated the largest amount of energy at both the forward and backward directions. Since the displacement value of Specimen 1 is greater than the displacement value of Specimen 2, Specimen 1 was dissipated more energy. The average energy dissipation values of Specimen 3 and Specimen 4 are close to each other. Although Specimen 2 was occurred higher stiffness value than Specimen 3, Specimen 3 was dissipated more energy.

T	est Specimens	Forward Cycles	Backward Cycles		
Test	Window Opening Type	Energy Dissipation	Energy Dissipation		
INU	Opening Type				
1	RS	566.79	421.56		
2	AACW	231.10	236.68		
3	DW	886.86	1667.74		
4	ISW	1171.92	1150.82		
5	ESW	3785.00	3664.00		

**Table 5.** Summary of test results as energy dissipation

### CONCLUSION

In this study; five RC frames with a scale of 1/5, single spans and two storey were produced so as to reflect the characteristics of existing structures. Two RC frames were used as the reference specimens that without an infill wall and autoclaved aerated concrete blocks (AAC) infilled wall. Other three RC frames were strengthened with infill RC shear wall, single skeleton drywall system and external RC shear wall and column jacket. All specimens produced were tested under reverse cyclic lateral loading and constant vertical loading. Strength, stiffness and energy dissipation capacities of all test specimens are compared with each other.

The experimental test results are summarized below;

• Strength and stiffness of different strengthened specimens (Specimen 3, Specimen 4 and Specimen

5) and a specimen with AACW infill walls (Specimen 2) were significantly higher than those for reference specimen (Specimen 1).

• Energy dissipation capacities of different strengthened specimens were also significantly higher than those for reference specimen. But energy dissipation capacities of Specimen 2 was lower than as reference specimen. Since the displacement value of Specimen 1 was greater than the displacement value of Specimen 2, Specimen 1 was dissipated more energy.

• Although the load carrying capacity of Specimen 3 (DW) was lower than Specimen 4 (ISW), the average energy dissipation value was higher than the average energy dissipation value of Specimen 4. Because Specimen 3 exhibited a more ductile behavior than Specimen 4.

• The short column behavior was observed at the first storey of Specimen 3 (DW), Specimen 4 (ISW) and Specimen 2 (AACW). Thanks to RC column jackets, at Specimen 5 with the external RC shear wall were prevented to the short column behavior.

• The infill wall of Specimen 2 (AACW) was showed behavior out-of-plane at the test. This behavior observed at the infill wall of the Specimen 2 were increased the risk of occurring a soft story at the RC frame. Because the drywall system (Specimen 3) were anchored to RC frames, at this specimen has not been observed the out-of-plane behavior. Thus, the soft storey behaviour can be largely prevented by the dry wall strengthened method.

• Specimen 3 strengthened with drywall system has much lighter according to other strengthened specimens. Thanks to this strengthening method, seismic load acting on structures can be reduced. It is much easier and quicker to construct when this drywall system is used in the seismic strengthening of the existing building compared to the RC infill wall and external RC shear wall.

Different types of curtain wall systems are used to provide thermal insulation of RC structures. CFS drywall systems are one of these. The results of the study showed that CFS drywall systems have the positive contributions to the seismic behavior of RC structures. However, the seismic contribution to RC structures was limited according to other methods in the study.

#### ACKNOWLEDGEMENT

The project presented in this article was supported by Necmettin Erbakan University Scientific Research Projects Office (BAP).

### REFERENCES

- Accorti, M., Baldassino, N., Zandonini, R., Scavazza, F., Rogers, C. A., 2016, "Reprint of Response of CFS Sheathed Shear Walls", Structures, Vol. 8, pp. 318-330.
- Akin, E., Korkmaz, S. Z., Korkmaz, H. H., Diri, E., 2016, "Rehabilitation of Infilled Reinforced Concrete Frames with Thin Steel Plate Shear Walls", Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 30, No. 4, 04015098.
- Altin, S., Anil, O., Kara, M.E., 2008, "Strengthening of RC Nonductile Frames with RC Infills: An Experimental Study", Cement&Concrete Composites, Vol. 30, No. 7, pp. 612-621.
- Altın, S., Ersoy, U., Tankut, T., 1992, "Hysteretic Response of Reinforced Concrete Infilled Frames", ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 8, pp. 2133-2150.
- Anıl, Ö., Altın, S., 2007, "Experimental Study on Reinforced Concrete Partially Infilled Frames", Engineering Structures, Vol. 29, No. 3, pp. 449-460.
- Aykaç, B., Özbek, E., Babayani, R., Baran, M., Aykaç, S., 2017, "Seismic Strengthening of Infill Walls with Perforated Steel Plates", Engineering Structures, Vol. 152, pp. 168-179.
- Bahadır, F., Balık, F.S., 2017, "Predicting Displacement Data of Three-Dimensional Reinforced Concrete Frames with Different Strengthening Applications Using ANN", Periodica Polytechnica Civil Engineering, Vol. 61, No. 4, pp. 843-856.
- Balık, F.S., Bahadır, F., Kamanlı, M., Korkmaz, H.H., Ünal, A., Kaltakcı, M.Y., 2018, "The Behavior of Strengthening 1/3 Scaled Reinforced Concrete Frames by Using Reinforced Concrete Shear Walls with Openings", Selcuk Univ. J. Eng. Sci. Tech., Vol. 6, No. 2, pp. 279-295.

- Baran, E., Alica, Cagatay., 2012, "Behavior of cold-formed steel wall panels under monotonic horizontal loading", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 79, pp. 1-8.
- Baran, M., Susoy, M., Tankut, T., 2011, "Strengthening of Deficient RC Frames with High Strength Concrete Panels: An Experimental Study", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 37, No. 2, pp. 177-196.
- Baran, M., Tankut T., 2011, "Experimental Study on Seismic Strengthening of Reinforced Concrete Frames by Precast Concrete Panels", ACI Struct. J., Vol. 108, I No. 2, pp. 227-237.
- Baran, M., 2005, *Precast Concrete Panel Reinforced Infill Walls for Seismic Strengthening of Reinforced Concrete Framed Structures*, Ph.D. Thesis in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara.
- Buonopane, S.G., White, R.N., 1999, "Pseudodynamic Testing of Masonry Infilled Reinforced Concrete Frames", ASCE, J of Structural Engineering, Vol. 125, No. 6, pp. 578- 589.
- Carrillo, J., Alcocer, S.M., 2013, "Experimental Investigation on Dynamic and Quasi-Static Behavior of Low-Rise Reinforced Concrete Walls", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 42, No. 5, pp. 635-652.
- Choi, I.R., Park, H.G., 2010, "Cyclic Loading Test for Reinforced Concrete Frame with Thin Steel Infill Plate", Journal of Structural Engineering, Vol. 137, No. 6, pp. 654-664.
- Dautaj, A.D., Kadiri, Q., Kabashi, N., 2018, "Experimental Study on The Contribution of Masonry Infill in The Behavior of RC Frame Under Seismic Loading", Engineering Structures, Vol. 165, pp. 27-37.
- Demirel, I.O., Yakut, A., Binici, B., Canbay, E., "Betonarme Çerçevelerde Dolgu Duvar Etkisinin İncelenmesi Üzerine Deneysel Çalışma", 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, DEÜ–İzmir, 14-16 Ekim 2015.
- Demirel, I.O., Canbay, E., Binici, B., Yakut, A., Eryurtlu, Z., "Gazbeton Dolgulu Betonarme Çerçevelerin Deprem Performansı Üzerine Deneysel Çalışma", 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, DEÜ–İzmir, 14-16 Ekim 2015.
- Elgaaly, M., 1998, "Thin Steel Plate Shear Walls Behavior and Analysis", Thin-Walled Structures, Vol. 32, No. 1-3, pp. 151-180.
- Erdem I, Akyüz U., Ersoy, U., Özcebe, G., 2006, "An Experimental Study on Two Different Strengthening Techniques for RC Frames", Engineering Structures, Vol. 28, No. 13, pp. 1843-1851.
- Fülöp, L.A., Dubina, D., 2004, "Performance of Wall-Stud Cold-Formed Shear Panels Under Monotonic and Cyclic Loading: Part I: Experimental Research", Thin-Walled Structures, Vol. 42, No. 2, pp. 321-338.
- Ha, S.K., Yu, S.Y., Kim, J.S., 2018, "Experimental Study on Existing Reinforced Concrete Frames Strengthened by L-type Precast Concrete Wall Panels to Earthquake-Proof Buildings", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 22, No. 9, pp. 3579-3591.
- Hayashi, T., Niwa, H., Fukuhara, M., "Strengthening Methods of The Existing Reinforced Concrete Buildings", Proceedings of The 7th World Conference on Earthquake Engineering, Istanbul-Turkey, 89-96, 8-13 September 1980.
- Higashi Y., Endo, T., Ohkubo, M., Shimizu, Y., "Experimental Study on Strengthening Reinforced Concrete Structure by Adding Shear Wall", Proceedings of The 7th World Conference on Earthquake Engineering, Istanbul-Turkey, 173-180, 8-13 September 1980.
- Kamanlı, M., Korkmaz, H. H., Balık, F. S., Bahadır, F., "Sünek Olmayan B/A Çerçevelerin, Çelik Çaprazlarla, B/A Dolgu Duvarlarla ve Çelik Levhalar İle Güçlendirilmesi", 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Ankara, 1-9, 11-14 Ekim 2011.
- Kara M.E., 2006, Strengthening of Non-Ductile Reinforced Concrete Frames by Reinforced Concrete Partial Infills, Ph.D. Thesis, Gazi University, Institute of Science and Technology, Ankara.
- Kara, M.E., Altin, S., 2006, "Behavior of Reinforced Concrete Frames with Reinforced Concrete Partial Infills", ACI Structural Journal, Vol.103, No. 5, pp. 701-709.
- Kaya, F., Tekeli, H., Anil, Ö., 2018, "Experimental Behavior of Strengthening of Masonry Infilled Reinforced Concrete Frames by Adding Rebar-Reinforced Stucco", Structural Concrete, pp.1-14.

- Korkmaz, S.Z., Kamanli, M., Balik, F.S., Bahadir, F., Korkmaz, H.H., 2011, Seismic Performance Improvement of Nonductile RC Frames with User Friendly External Strengthening Applications", International Journal of Arts & Sciences, Vol. 4, No. 19, pp. 349-359.
- Lee, H.S., Woo, S.W., 2002, "Effect of Masonry Infills on Seismic Performance of a 3-Storey R/C Frame with Non-Seismic Detailing", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 31, No. 2, pp. 353-378.
- Mehrabi, A.B., Shing, P.B., Schuller, M.P., Noland, J.L., 1996, "Experimental Evaluation of Masonry-Infilled RC Frames", Journal of Structural engineering, Vol. 122, No. 3, pp. 228-237.
- Mohebbi, S., Mirghaderi, S.R., Farahbod, F., Sabbagh, A.B., Torabian, S., 2016, "Experiments on Seismic Behaviour of Steel Sheathed Cold-Formed Steel Shear Walls Cladded by Gypsum and Fiber Cement Boards." Thin-Walled Structures, Vol. 104, pp. 238-247.
- Ozcebe, G., Ersoy, U., Tankut, T., Erduran, E., Keskin, R.S.O., Mertol, H.C., 2003, "Strengthening of Brick-Infilled RC Frames with CFRP", Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara-Turkey.
- Ozcebe, G., Ersoy, U., Tankut, T., Ugurhan Akyuz, U., Erduran, E., "Rehabilitation of Existing Reinforced Concrete Structures Using CFRP Fabrics", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, paper no. 1393, 1-6 August 2004.
- Pan, C.L., Shan, M.Y., 2011, "Monotonic Shear Tests of Cold-Formed Steel Wall Frames with Sheathing", Thin-Walled Structures, Vol. 49, No. 2, pp. 363-370.
- Suzuki, T., Choi, H., Sanada, Y., Nakano, Y., Kazuto Matsukawa, Devjyoti Paul, Gülkan, P., Binici, B., 2017, "Experimental Evaluation of The In-Plane Behaviour of Masonry Wall Infilled RC Frames", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 15, No. 10, pp. 4245-4267.
- Tankut, T., Ersoy, U., Ozcebe, G., Baran, M., Kuyucu, D., 2005, "In Service Seismic Strengthening of RC Framed Structures", Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings, International Closing Workshop, NATO Project Sfp., Vol. 977231, Istanbul, Turkey
- Wang, X., Ye, J., 2015, "Reversed Cyclic Performance of Cold-Formed Steel Shear Walls with Reinforced end Studs", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 113, pp. 28-42.
- Ye, J., Wang, X., Jia, H., Zhao, M., 2015, "Cyclic Performance of Cold-Formed Steel Shear Walls Sheathed with Double-Layer Wallboards on Both Sides", Thin-Walled Structures, Vol. 92, pp. 146-159.
- Yılmaz, Ü., Arslan, M.H., Kaltakcı, M.Y., 2010, "Betonarme Dış Perde Duvarla Güçlendirilmiş Çerçevelerin Dayanım Parametrelerinin Deneysel ve Analitik Yöntemlerle İrdelenmesi", TÜBAV Bilim Dergisi, Vol. 3, No. 1, pp. 11-12.
- Zovkic, J., Sigmund, V., Guljas, I., 2013, "Cyclic Testing of a Single Bay Reinforced Concrete Frames with Various Types of Masonry Infill", Earthquake engineering & structural dynamics, Vol. 42, No. 8, pp. 1131-1149.